

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ



นายอภิรักษ์ มังกรแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**FABRICATION OF SELECTIVE EMITTER SOLAR
CELLS BY LOW COST TECHNIQUE**

Apirak Mangkornkaew

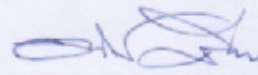


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2016**

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ

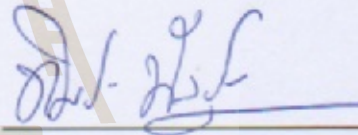
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



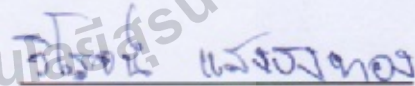
(รศ. ดร.อาทิจ ศรีแก้ว)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ ทังสุวรรณรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



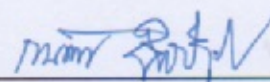
(อ. ดร.วิโรจน์ แสงซองทอง)

กรรมการ



(ศ. ดร.สุก้อง ลิ้มปิยะนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนดรร ขำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิรักษ์ มังกรแก้ว : การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ (FABRICATION OF SELECTIVE EMITTER SOLAR CELLS BY LOW COST TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์, 120 หน้า.

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell) เป็นโครงสร้างแบบหนึ่งที่สามารถให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้น n-Si ที่เป็นชั้นรับแสงมีความบางและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (Sheet resistance, ρ_{Sheet}) สูงขึ้นจากการแพร่สารเจือในปริมาณต่ำ (Low dopant) ซึ่งทำให้ลดผลของค่าความเร็วการรวมตัวใหม่ของพาหะได้ มีค่าช่วงชีวิตของพาหะสูงขึ้นอย่างเหมาะสม และทำให้คุณสมบัติที่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินได้เพิ่มขึ้น และชั้นบริเวณ n⁺⁺-Si ได้ข้อไฟฟ้าให้มีค่า ρ_{Sheet} ต่ำ เกิดจากการแพร่สารเจือในปริมาณสูง (High dopant) ส่งผลให้เกิดโอห์มมิกที่ดี และเป็นการลดผลที่เกิดจากค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัส (Contact resistance, R_c) บริเวณรอยต่อข้อไฟฟ้ากับชั้น n-Si ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) มีค่าสูงขึ้น

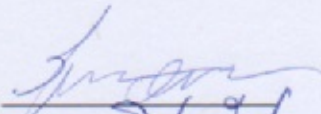
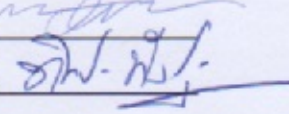
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการใช้แหล่งสารเจือสารละลายโซล-เจล ฟอสฟอรัส (PSG) ที่มีความต่างกันของอะตอมฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.30 %at. ถึง 0.86 %at. สารละลาย PSG เข้มข้นต่ำเคลือบบนบริเวณรับแสงด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง และสารละลาย PSG เข้มข้นสูงเคลือบบริเวณได้ข้อไฟฟ้ากริดด้วยวิธีพิมพ์ลายหลังจากการแพร่สารเจือด้วยความร้อน 1000 °C นาน 60 นาที ได้ค่า ρ_{Sheet} ที่แตกต่างกัน 2 บริเวณ โดยที่บริเวณรับแสง n-Si มีค่า ρ_{Sheet} สูงประมาณ 240 Ω/Sq บริเวณที่ ρ_{Sheet} ได้ข้อไฟฟ้ามีค่าต่ำประมาณ 20 Ω/Sq ความลึกชั้น n-Si คำนวณได้จากกฎของ Fick (Fick law) มีค่าประมาณ 0.60 μm ในการศึกษาสมบัติทางแสงได้สร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ และยังเป็นชั้นพาสซีเวชันด้วยฟิล์มบาง PSG ซึ่งก่อตัวขึ้นหลังจากการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ฟิล์มบาง PSG ที่ผลิตขึ้นมีความหนา 100 ถึง 110 nm สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับ (%R) มีค่าเฉลี่ยลดลง 9.94%WR ในช่วงความยาวคลื่น 280 ถึง 800 nm เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีชั้น PSG เมื่อพิจารณาช่วงความยาวคลื่น 550 ถึง 800 nm พบว่าชั้น PSG สามารถลดค่า %R ได้ถึง 10.93%WR เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีชั้น PSG

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้าง SE cell ในแง่ของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัส จากผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เกิดขึ้นที่ชั้น n-Si พบว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (SE) ให้ค่าช่วงชีวิตสูงขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานโครงสร้าง n-Si แบบสม่ำเสมอ SE cell ที่ใช้วิธีผลิตแบบต้นทุนต่ำจากสารละลาย PSG

สามารถส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้มีค่าเพิ่มขึ้น 1.47% เมื่อเทียบกับเซลล์
แสงอาทิตย์โครงสร้างทั่วไป



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

APIRAK MANGKORNAEW : FABRICATION OF SELECTIVE
EMITTER SOLAR CELLS BY LOW COST TECHNIQUE. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. THIPWAN FANGSUWANNARAK, Ph.D.,
120 PP.

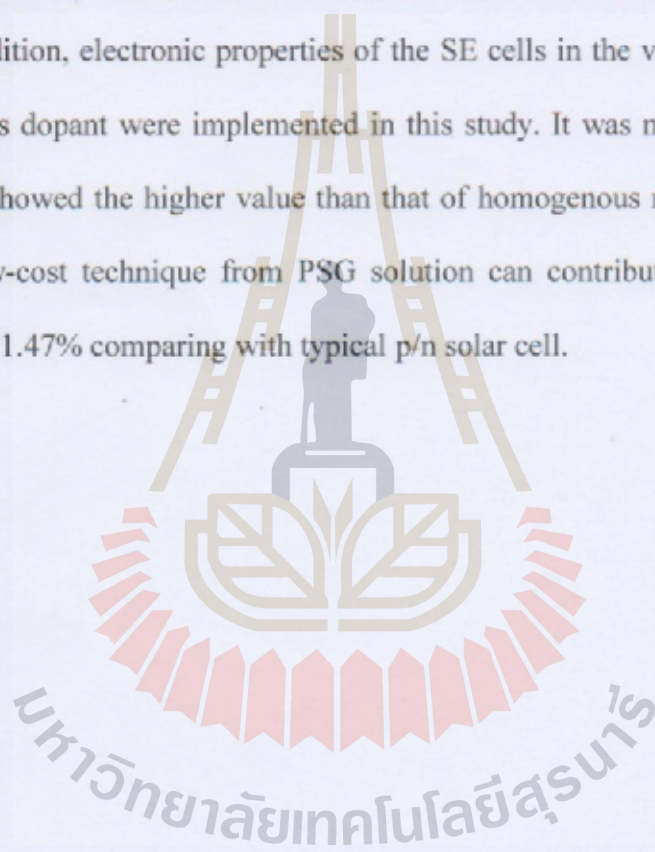
SELECTIVE EMITTER SOLAR CELL/SCREEN PRINTING/STAMPING/LOW COST

Selective emitter photovoltaic cell (SE cell) is a scheme to result in the efficiency improvement of crystalline silicon solar cell. This is due to that thin n-Si layer from low-dopant diffusion has appropriately higher value of sheet resistance ρ_{sheet} . It contributes to effective reduction of carrier recombination velocity, longer carrier life-time and finally higher ability of blue-wavelength absorption. Another heavily doped n^+ Si area underneath the metallized region provides low ρ_{sheet} value from high-dopant diffusion to contribute to good ohmic metallized contact and effective reduction of contact resistance (R_C). This leads to higher short circuit current (I_{SC}) and increased open circuit voltage (V_{OC}) for SE solar cell.

In this study, the fabrication of SE cell was investigated by the using low-cost technique with exploiting phosphorus sol-gel (PSG). The phosphorus concentration was varied between 0.30 %at and 0.86 %at. PSG solution with low concentration was spin-coated for acting as low-dopant source, while PSG solution with high concentration was screen-printed for using as high-dopant source. The different ρ_{sheet} values occurred after thermal diffusion process. High ρ_{sheet} (240 Ω/Sq) and low ρ_{sheet} (20 Ω/Sq) were formed in n-Si emitter area and underneath metallized area,

respectively. The depth of n-Si layer calculated by Fick's law is of $0.60 \mu\text{m}$. In optical study, anti-reflection coating (ARC) layer was fabricated for reducing light-reflection and passivation approach to provide thickness around 100-110 nm. This thin PSG obtained average reflective coefficient reduced by 9.94%WR comparing with sample with no PSG. In particular wavelength between 550-800 nm, PSG film can reduce %R by 10.93%WR comparing with sample with no PSG.

In addition, electronic properties of the SE cells in the various concentrations of phosphorus dopant were implemented in this study. It was noted that life-time of SE samples showed the higher value than that of homogenous n-Si sample. SE cells based on low-cost technique from PSG solution can contribute to increase of PV efficiency by 1.47% comparing with typical p/n solar cell.

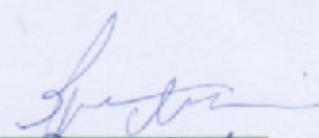
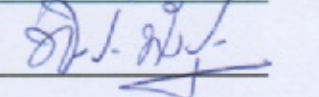


School of Electrical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2558 กลุ่มเรื่องการบริหารจัดการพลังงานและสร้างพลังงานทดแทน ชื่อโครงการ การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ และผู้วิจัยได้รับทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) และยังได้รับทุนนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการช่วยเหลือทางด้านวิชาการ และการดำเนินการทางด้านเทคนิคของการวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย จนกระทั่งการวิจัยสำเร็จลง และได้ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ออกมาสมบูรณ์ อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจในการทำวิจัย และเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ดร.ทวิวัฒน์ กระจำสังข์ นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิจัยประจำศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ คุณณัฐพล ช่วงสุวนิช ผู้จัดการฝ่ายเทคโนโลยี บริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ตลอดจนให้คำชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัย คุณอัญชลี รักด่านกลาง และพนักงานธุรการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ให้ความรู้และแนวทางต่าง ๆ ในการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านต่าง ๆ และขอบพระคุณ แม่ กำไร บุศรทา และพ่อวุฒิ มังกรแก้ว ที่ได้อบรมเลี้ยงดูให้การสนับสนุนทางการศึกษาดำเนินการด้วยดีเสมอมา คอยเป็นกำลังใจ และแบบอย่างในการใช้ชีวิตเสมอมา

อภิรักษ์ มังกรแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 รูปแบบการจัดเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ทัศนวิสัยการมองเห็นและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.3.1 การดูดกลืนแสงโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน.....	14
2.3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n.....	18
2.3.3 ข้อจำกัดของชั้นรับแสง (n-Si).....	24
2.3.4 การออกแบบระยะห่างขั้วไฟฟ้าด้านบน.....	27
2.3.5 ปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter Solar cell).....	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

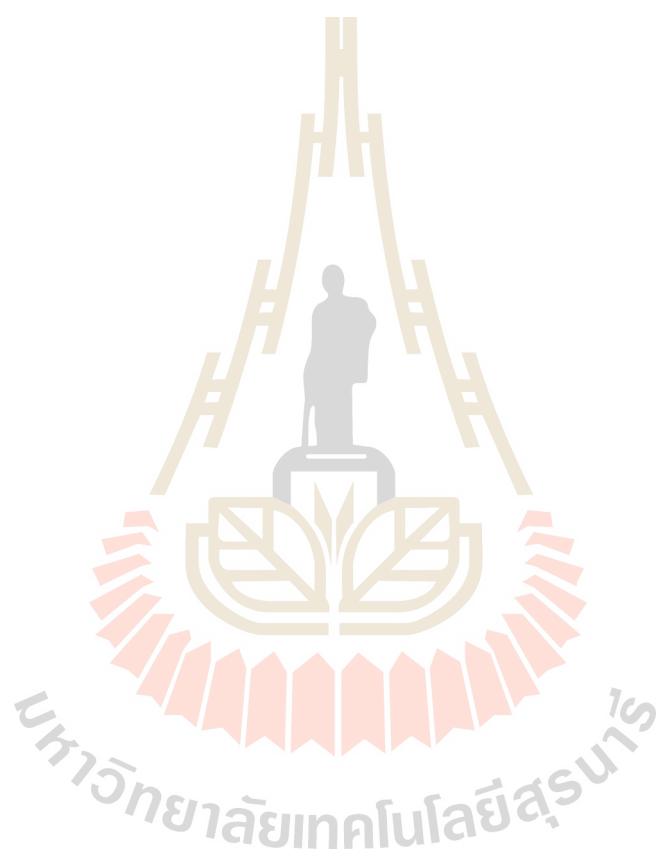
2.3.6 ช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime).....	30
2.3.7 แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์.....	33
3 ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์	
ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ.....	35
3.1 บทนำ.....	35
3.2 การสร้างชั้นฟิล์ม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ	
ซีเลคทีฟอิมิตเตอร์.....	35
3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือในชั้น n-Si.....	35
3.2.2 เทคนิคต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	
โครงสร้างแบบ SE (Selective Emitter).....	37
3.2.2.1 การผลิตฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating).....	38
3.2.2.2 การสร้างลวดลายฟิล์ม PSG ด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing).....	39
3.3 การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion).....	40
3.3.1 เงื่อนไขการแพร่สารเจือ PSG 2 บริเวณ.....	40
3.3.2 ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับด้วยฟิล์ม PSG	43
3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
3.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคการประทับลาย.....	48
3.5 สรุป.....	55
4 การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า ทางแสง และทางโครงสร้างระดับจุลภาค ของเซลล์แสงอาทิตย์	
แบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์.....	56
4.1 บทนำ.....	56
4.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n Si ด้วยเทคนิคสารละลายหมุนเหวี่ยง (Spin on	
Doped, SOD) และการพิมพ์ลาย (Screen printing).....	56
4.2.1 ผลของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC)	
ด้วยฟิล์ม PSG (Phosphorus Silicate Glass).....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 ผลการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n Si ด้วยเทคนิค Spin on Doped (SOD).....	66
4.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n Si ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (SE Solar cell)...	66
4.3.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคการสร้าง ลวดลายด้วยแสง (Photolithography process).....	67
4.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing).....	71
4.3.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคการประทับลาย (Stamping Technique).....	74
4.4 เปรียบเทียบราคาประมาณของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างพื้นฐานกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์.....	83
4.5 สรุป.....	87
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปงานวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลาย P-inks.....	94
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณหาความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย P-inks.....	99
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณหาความลึกของชั้น n ด้วยวิธีของ Fick's first law และ Gaussian Distribution.....	101
ภาคผนวก ง ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America.....	108

ภาคผนวก จ ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime) ด้วยเครื่อง WCT-120	
Sinton.....	110
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	120



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เทคนิควิธีที่ใช้สร้าง SE cell.....11
2.2	เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์.....13
3.1	ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในแต่ละเงื่อนไขสำหรับการเตรียมสารละลาย PSG ink.....37
3.2	เงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ42
4.1	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค SOD.....66
4.2	การวัดค่าประสิทธิภาพของ SE cell ด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง.....71
4.3	การวัดค่าประสิทธิภาพของ SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย.....74
4.4	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ ของพาหะของชั้น n-Si ที่ผ่านกระบวนการ Etching Back.....81
4.5	ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพื้นฐาน.....84
4.6	ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิค Photolithography.....84
4.7	ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการใช้ Laser.....85
4.8	ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย.....86
4.9	ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย.....86
4.10	เปรียบเทียบราคาเครื่องจักรสำหรับการผลิต SE cell.....87

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused Cell)....2
1.2	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ SE (Selective Emitter).....4
2.1	แผนภาพวิธีพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง.....12
2.2	ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุซิลิคอนภายใต้แสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ตกกระทบผิววัสดุ.....15
2.3	ความสัมพันธ์ของค่าความลึกของการดูดกลืนแสงของวัสดุซิลิคอนภายใต้แสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ตกกระทบผิววัสดุ.....15
2.4	กลไกการดูดกลืนแสงของซิลิคอนด้านรับแสงจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนวัสดุและการสูญเสียที่เกิดขึ้น.....16
2.5	สเปกตรัมแสงอาทิตย์และย่านแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ใช้แปลงพลังงานเป็นไฟฟ้า.....17
2.6	(ก) แลปพลังงานรอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีด (ข) กราฟ Seni-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ภายใต้ที่มีด.....19
2.7	(ก) แลปพลังงานรอยต่อ p/n-Si ภายใต้แสงตกกระทบ (ข) กราฟ Seni-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ภายใต้แสงตกกระทบ.....20
2.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้แสงตกกระทบ (ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงตกกระทบ.....23
2.9	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงค่าความต้านทานภายใน.....24
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะกับระยะความลึกของการแพร่เพื่อแสดงพื้นที่ของ Dead layer.....25
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสกับระยะความลึกในวัสดุ.....26
2.12	ลักษณะข้อไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....27
2.13	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 25%29
2.14	ลักษณะการดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นสั้นและยาว เกิดขึ้นที่ผิวพื้นและลึกลงไปตามลำดับ.....29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency) ภายใต้แสงกับความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างซีเลคทีอิมิตเตอร์	30
2.16 ลักษณะของการเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	34
2.17 (ก) รูปแบบการเกิดเป็นเจลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และ(ข) รูปแบบการเกิดเป็นเจลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส.....	34
3.1 (ก) ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG และ (ข) ลักษณะของสารละลาย PSG.....	36
3.2 โครงสร้าง SE cell.....	38
3.3 กราฟอัตราการขึ้น และลงของอุณหภูมิในการอบฟิล์ม PSG	39
3.4 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย PSG เข้มข้นสูง.....	39
3.5 ภาพถ่ายฟิล์มสารเจือ PSG 2 บริเวณ.....	40
3.6 กราฟอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการแพร่.....	42
3.7 ภาพถ่ายผิวด้านบนของแผ่นฐานซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน.....	43
3.8 ผลกระทบการสะท้อนแสงที่เกิดจากชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ.....	44
3.9 กราฟการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสะท้อนแสงกลับของฟิล์ม PSG.....	45
3.10 แผนภาพการกำจัดชั้น BSG film และการสกัดชั้น PSG film ที่ผิวแผ่นฐาน p/n-Si.....	45
3.11 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านบน.....	46
3.12 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านหลัง.....	47
3.13 ภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าหลังจากที่ผ่านกระบวนการ Fast firing ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าด้านบน และ (ข) ภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าด้านหลัง.....	47
3.14 แผนภาพขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าให้เซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบระหว่างการสร้างในอุตสาหกรรมกับในห้องปฏิบัติการ.....	48
3.15 แผนภาพกระบวนการสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณด้วยวิธีการ Etching back.....	49
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอะตอมสารเจือกับระยะความลึกของการ Etching back.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17	ภาพถ่าย (ก) เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V และ (ข) หลอดฟลักซ์ภายในเครื่อง.....51
3.18	ภาพถ่ายระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง Flash Stamp.....51
3.19	(ก) ภาพถ่ายลวดลายป้องกันแสงเฟลซ และ(ข) ภาพถ่ายโฟมที่จะนำมาสร้างลวดลายสำหรับการประทับลาย.....52
3.20	ภาพถ่าย Foam Stamp ที่ถูกสร้างลวดลายใช้สำหรับการประทับลายเพื่อสร้างลวดลายบน Poly Si (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Foam Stamp และ (ข) ลักษณะบริเวณลายเปิดและบริเวณลายปิดของ Foam Stamp ที่เกิดขึ้น ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....53
3.21	ภาพถ่ายลวดลายของสารพอลิเมอร์ที่ถูกประทับลวดลายด้วย Foam Stamp ลงบน n-Si ภาพถ่าย (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นหลังจากการประทับลายด้วยสารไวแสง และ (ข) ลักษณะของลวดลายที่ได้จากการประทับลายที่กำลังขยาย 50 เท่า.....53
3.22	ภาพถ่ายของลวดลายที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการ Etched Back (ก) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etched Back และ (ข) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etched Back ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....54
4.1	ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค SOD.....57
4.2	ลักษณะการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ด้วย 4-point probe.....59
4.3	(ก) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น 4-point probe (ข) ส่วนประกอบการวัดค่า ρ_{Sheet} ด้วย KEITHLEY 2400 และ Digital multi-meter FLUKE 179.....60
4.4	กราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ภายใต้เงื่อนไข TEOS : H ₃ PO ₄60
4.5	ภาพถ่ายรอยต่อ p/n-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือด้วยความร้อนบน Poly-Si.....61
4.6	กราฟการจำลองทางคณิตศาสตร์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของแสงที่เหมาะสม ที่มีผลต่อการสะท้อนกลับของโฟตอนน้อยที่สุด.....63
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและค่าดัชนีหักเหของแสงของชั้น PSG ที่วัดด้วยเครื่อง Ellipsometer ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมสารเจือในสัดส่วนต่าง ๆ.....63
4.8	กราฟการจำลองค่า %R ภายใต้เงื่อนไขของค่าความหนาฟิล์ม 100 nm และ n = 1.5..... 64
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %R และความยาวคลื่นแสงในช่วง 190 nm ถึง 850 nm ของชั้น ARC บนแผ่นฐานซิลิคอน.....65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.10	โครงสร้าง SE cell.....	67
4.11	ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ฟอสฟอรัสด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง.....	69
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงเทียบกับเซลล์อ้างอิงรอยต่อ p/n.....	70
4.13	ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลวดลาย (Screen printing).....	72
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ของ SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย.....	73
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ Etching back.....	75
4.16	โครงสร้างชั้นรับแสงของเซลล์ C-Si (ก) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ยังไม่ถูกกัด (ข) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดด้วยวิธี RIE และ (ค) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี.....	76
4.17	ภาพถ่ายเครื่อง Scanning Electron Microscope (W-SEM).....	77
4.18	(ก) โครงสร้างชั้นรับแสงแผ่นฐาน Poly-Si (ข) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดแต่ยังไม่ได้ล้าง RCA1 และ (ค) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดผ่านการล้าง RCA1.....	78
4.19	ขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย.....	80
4.20	เครื่องวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ Sinton รุ่น WCT-120 จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC).....	81
4.21	เปรียบเทียบค่าช่วงชีวิตพาหะของชั้น n-Si หลังจากผ่านกระบวนการ Etching Back.....	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
Ag	=	โลหะเงิน
Al	=	โลหะอลูมิเนียม
ARC	=	ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-reflection coatings)
BSF	=	Back surface field
BSG	=	Borosilicate glass
CZ	=	Czochralski
c	=	ค่าความเร็วแสง $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
D_e	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
D_h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
D	=	อุณหภูมิการแพร่จำเพาะ
D_0	=	ค่าคงที่ของการแพร่ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
d_1	=	ความหนาของชั้นฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสงกลับ
$E_{(ev)}$	=	ค่าพลังงาน
$E_{G(Si)}$	=	แถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอน
E_{ph}	=	พลังงานแสงตกกระทบ
E_C	=	แถบความนำ (Conduction band)
E_V	=	แถบวาเลนซ์ (Valence band)
E_d	=	พลังงาน Activation ของการแพร่สารเจือ (eV)
FZ	=	Floating zone
FF	=	Fill factor
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) $4.14 \times 10^{-15} eV \cdot s$
I_{ph}	=	กระแสโฟโตหรือกระแสที่เกิดจากแสงตกกระทบ
I_{net}	=	กระแสไฟฟ้ารวม
I_0	=	กระแสอิ่มตัว
I_{sc}	=	กระแสลัดวงจร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K	=	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann) $1.380 \times 10^{-23} \text{ J / K}$
L_e	=	ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	=	ระยะทางการแพร่ของโฮล
n-Si	=	วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น
n^{++} selective	=	ชั้นเอ็นบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า
n^{++} -Si	=	วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีปริมาณสารเจือสูง
n_p	=	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ในชั้นพี
n_i	=	ความหนาแน่นของพาหะ
N_A	=	อะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor)
N_D	=	อะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor)
Δn	=	ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินข้างน้อย
$N(x,t)$	=	ความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ t ใด ๆ
N_0	=	ความหนาแน่นของสารเจือที่ผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ($\text{atom} \cdot \text{cm}^{-3}$)
n	=	ค่าดัชนีหักเหของแสง
n_0	=	ค่าดัชนีหักเหของแสงของอากาศหรือกระจก
n_1	=	ค่าดัชนีหักเหของแสงของชั้นป้องกันการสะท้อนแสง
n_2	=	ค่าดัชนีหักเหของแสงของซิลิคอน
OM	=	กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy)
p/n-Si	=	รอยต่อพี-เอ็นของวัสดุซิลิคอน
p-Si	=	วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี
p^{++} -Si	=	วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพีที่มีปริมาณสารเจือสูง
p_n	=	ความหนาแน่นของโฮลต่อพื้นที่ในชั้นเอ็น
P_{in}	=	กำลังไฟฟ้าอินพุตหรือกำลังงานทั้งหมดที่ได้จากแสง
PSG	=	Phosphor silicate glass
PERL	=	Passivated emitter rear locally diffused cell
q	=	ประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$Q(t)$	=	จำนวนอะตอมสารเจือต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย
QE	=	ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency)
QSSPC	=	Quasi-steady-state photoconductance
R_c	=	ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance)
R_{sh}	=	ค่าความต้านทานขนาน (Shunt resistance)
%R	=	ค่าการสะท้อนแสงกลับ (Reflectance)
R	=	อัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ
RCA	=	Radio Corporation of America
SOD	=	Spin on Doped
SSOD	=	Spin and Screen on Doped
SE	=	ชั้นรับแสงบางบริเวณ (Selective Emitter)
SE cell	=	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter solar cell)
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope)
T	=	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (Kelvin, K)
t	=	เวลาที่ใช้ในการแพร่หน่วยวินาที (s)
v	=	ค่าความเร็วหน่วยเมตรต่อวินาที (m/s)
V_{oc}	=	แรงดันเปิดวงจรหน่วยโวลต์ (V)
x	=	ระยะความลึกของการแพร่หน่วยไมโครเมตร (μm)
λ	=	ความยาวคลื่น (nm)
η	=	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน
τ	=	ค่าช่วงชีวิตของพาหะ
ρ_{Sheet}	=	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นหน่วยโอห์มต่อแผ่น (Ω/Sq)
Ω	=	โอห์ม (Ohm)
Sq	=	แผ่น หรือ สี่เหลี่ยม (Square)
$\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$	=	Tetraethyl orthosilicate (TEOS)
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	=	Ethanol (EtOH)
H_2O	=	น้ำ (Water)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

NH_4OH	=	แอมโมเนีย (Ammonia)
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
HF	=	กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid)
SiO_2	=	ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas)
N_2	=	ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)
H_2O_2	=	ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
H_3PO_4	=	กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)



บทที่ 1

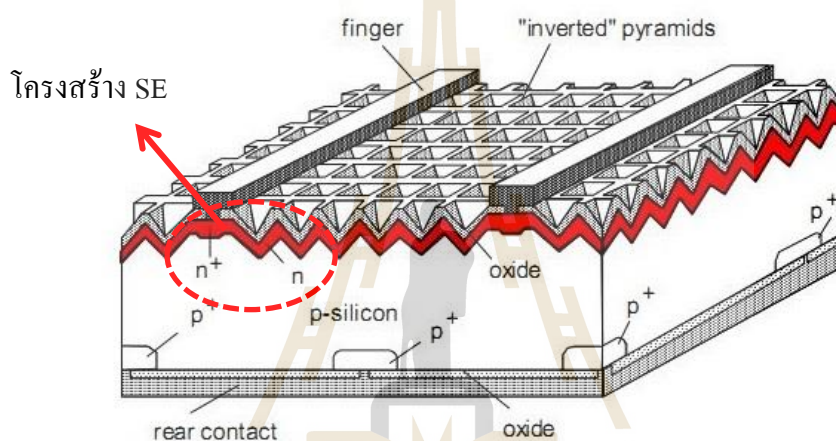
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงอย่างมีประสิทธิภาพด้วยการใช้แผ่นวัสดุสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงและผลิตกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ และจัดเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง การใช้งานส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีเป็นจำนวนมากในโลกและมีราคาถูก จากวัตถุดิบของแร่ควอตซ์หรือทราย โดยผ่านขั้นตอนทางเคมีทำให้ได้ซิลิคอนบริสุทธิ์สูงและสร้างเป็นผลึกได้ด้วยวิธีไซโครลสกี (Czochralski, CZ) หรือ โฟลตติ้งโซน (Floating zone, FZ) โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์จัดตามประเภทของโครงสร้างวัสดุคือ 1. ผลึกเดี่ยว (Mono crystalline หรือ Single crystalline) 2. ผลึกหลายรูป (Poly crystalline หรือ Multi-crystalline) 3. ฟิล์มบางไร้ผลึกหรือแบบอสัณฐาน (Amorphous film)

อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีการสูญเสียการแปลงพลังงาน เช่น เกิดการทะลุผ่านแสง (Transmission losses) จากแสงที่ย่านความยาวคลื่นยาวกว่าค่าช่องว่างพลังงานทางแสงของผลึกซิลิคอน ($E_g(\text{Si}) = 1.12 \text{ eV}$) อีกทั้งยังเกิดการสูญเสียจากแสงที่ความยาวคลื่นสั้นหรือมีพลังงานสูงเกินกว่าค่า $E_g(\text{Si})$ เกิดการสูญเสียเชิงความร้อน (Thermalization loss) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 15-17% ในอุตสาหกรรม และสูงสุดเท่ากับ 25% ในห้องปฏิบัติการ ขณะที่โครงสร้างที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากห้องปฏิบัติการนั้นสร้างชั้น n-Si ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นสูงขึ้น เพื่อความสามารถดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้มากขึ้น และสร้างชั้น n-Si เลือกบางบริเวณ (Selective Emitter, SE) ในส่วนได้ขั้วไฟฟ้ากริดให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นต่ำ ๆ เพื่อให้เกิดสมบัติโอห์มมิกที่ดีระหว่าง n-Si และขั้วโลหะไฟฟ้ากริด โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter solar cell, SE cell) ดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าสูงถึง 19% ซึ่งยังไม่พิจารณาการออกแบบส่วนอื่น ๆ อย่างไรก็ตามโครงสร้าง SE นั้นพึ่งพากระบวนการถ่ายทอดผลด้วยแสง (Photolithography) หรือใช้เทคโนโลยีแสงเลเซอร์ (Laser) ทำให้การผลิตดังกล่าวไม่เหมาะกับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้าง SE

ด้วยเทคนิคการแพร่ด้วยสารละลายหมึกฟอสฟอรัส ผ่านกระบวนการพิมพ์ลาย (Screen printing) และกระบวนการกัดด้วยสารละลาย (Etching back process) ซึ่งต้นทุนต่ำกว่าเทคโนโลยีการผลิต SE cell มีเป้าหมายที่สำคัญในการศึกษานี้คือหาแนวทางการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม จากแหล่งข้อมูลของ Solar Buzz ได้บ่งบอกถึงแนวโน้มการผลิตที่มากขึ้นของ SE cell และในอนาคตจะแทนที่เทคโนโลยีเซลล์ซิลิคอนประสิทธิภาพ 17% ด้วยการผลิตให้ประสิทธิภาพ 19% กับเทคโนโลยี SE cell ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้าง SE ที่เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL (Passivated emitter rear locally diffused cell) ที่ให้การแปลงพลังงานสูงถึง 24% มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused Cell) (Jianhua Zhao, Prog. Photovolt : Res. Appl. 7, 471-474 (1999))

เมื่อพิจารณาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศ การสร้างองค์ความรู้และนวัตกรรมทางเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถส่งเสริมการผลิตเซลล์ภายในประเทศให้มีเทคโนโลยีเป็นของตนเอง และสามารถต่อยอดและพัฒนาได้อย่างยั่งยืน ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังนั้นการศึกษาและทำความเข้าใจหลักการทำงานและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อการศึกษายกตัวอย่างเช่น หลักการของการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์จากการลดการสูญเสียภายในเซลล์แสงอาทิตย์ให้น้อยที่สุด ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL นั้นมีส่วนประกอบต่าง ๆ ในโครงสร้างที่ช่วยลดการสูญเสียค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

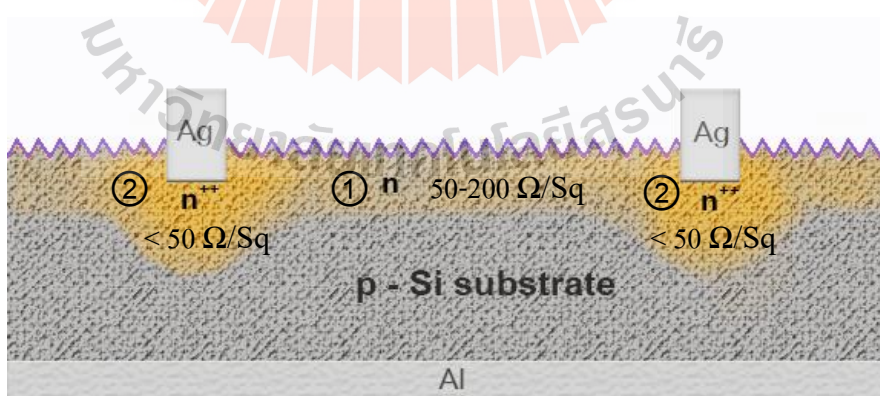
1. ผิวขรุขระทรงพีระมิดกลับหัว (Inverted pyramids) เพื่อลดแสงสะท้อนกลับที่ผิว สามารถให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่รับแสงที่มากขึ้น และดักแสงมากขึ้น (Light trapping)
2. การพาสซีเวชันที่ผิว (Surface passivation) คือการสร้างชั้นฉนวนบางๆ ขึ้นที่ผิวสัมผัสด้านบนและด้านหลังของเซลล์เพื่อลดจุดบกพร่องที่ผิว ทำให้สามารถช่วยลดผลของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว เนื่องจากเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ
3. การสร้างโครงสร้าง SE ให้กับชั้นหน้าต่างรับแสง เมื่อพิจารณาชั้น n-Si เป็นหน้าต่างรับแสงแล้วบริเวณพื้นที่ n-Si ระหว่างขั้วไฟฟ้าจำเป็นต้องมีคุณสมบัติค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นสูงจากปริมาณสารเจือต่ำ (lightly doping region) มีค่าอยู่ระหว่าง $50 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ ถึง $200 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ และที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบนจำเป็นต้องเป็นคุณสมบัติค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำจากปริมาณสารเจือสูง (Heavily doping region) โดยที่มีค่าต่ำกว่า $50 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ เพื่อช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (R_c) และให้รอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดี

อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ทั้ง 3 ส่วนต้องพึ่งพาวิธีการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) ซึ่งไม่เหมาะสมในงาน อุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้มีแนวคิดต่าง ๆ จากฝ่ายวิจัยและพัฒนาของโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และผลิตอุปกรณ์ประกอบ เพื่อหาวิธีการผลิตตามหลักการข้างต้นที่ใช้กระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตได้ปริมาณมาก การใช้เทคโนโลยีหมึกพิมพ์เป็นแหล่งสารเจือจางเป็นแนวคิดใหม่ ที่ให้ผลที่ดีสามารถจัดเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าในปี ค.ศ. 2013 (Sihua Zhong, 2013) และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จะเข้าสู่ยุคประสิทธิภาพ 19% ในที่สุด ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์ในประเทศไทยที่ใช้เทคโนโลยีเดิมจะได้รับผลกระทบมาก และอาจจะไม่สามารถผลิตเซลล์ออกแข่งขันกับตลาดได้ ดังนั้นการส่งเสริมงานวิจัยด้านการผลิตและพัฒนานั้นให้สามารถแข่งขันได้จึงมีความจำเป็นไม่น้อยไปกว่าการสนับสนุนซื้อพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะในที่สุดท้ายอาจจะไม่มีความมั่นคงทางพลังงานในระยะยาวได้เพราะพึ่งพาเทคโนโลยีของจากต่างประเทศมากเกินไป

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการลดค่าสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si ด้วย SE cell โดยวิธีการแพร่สารเจือด้วยสารละลายหรือหมึกฟอสฟอรัสซึ่งสังเคราะห์ขึ้นเองในห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยง (Spin process) และกระบวนการพิมพ์ลาย (Screen printing process) เพื่อให้เกิดลวดลายหรือกำหนดบริเวณแพร่สารเจือต่ำ (Lightly dope area) และบริเวณแพร่สารเจือสูง (Heavily dope area) ที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่างกัน ในปัจจุบันชั้นรับแสงเป็นชนิด n-Si ที่มี

ค่าต่ำแบบสม่ำเสมอ (Homogeneous n-Si) มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้ต่ำในแสงสีน้ำเงิน พลังงานสูง (Blue wavelength) แต่ข้อดีคือสามารถเกิดบริเวณสารเจือสูง (n^{++} -Si) ได้ด้วยไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น หลังจากกระบวนการให้ความร้อนที่ขั้วโลหะ (firing contact) ซึ่งเป็นเทคนิคที่อุตสาหกรรมการผลิตใช้งานกันอย่างแพร่หลายในขั้นตอนการพิมพ์ลายโลหะด้านบน และด้านหลังเซลล์ แนวคิดของการศึกษานี้คือการใช้เทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่แล้ว ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าวิธีที่ใช้หน้ากากไวแสง และการสักรับบริเวณสารเจือสูงเพื่อลดค่า ρ_{Sheet} ด้วยพลังงานพลาสมา หรือการใช้แสงเลเซอร์เพื่อให้เกิดการแพร่เฉพาะบริเวณ ดังนั้นในการศึกษานี้ได้นำแนวคิดของการแพร่สารเจือในขั้นตอนการแพร่ครั้งเดียว ด้วยสมมุติฐานของการแพร่สารเจือแบบให้ความร้อนสูง (High Temperature Diffusion) แบบไม่จำกัดแหล่งสารเจือด้วยสมการการแพร่แบบการกระจายแบบ Fick (Fick law) โดยใช้แหล่งสารเจือชนิดสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันมาสร้างโครงสร้าง SE ที่ชั้นรับแสง ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

1. บริเวณที่มีปริมาณสารเจือต่ำ (Lightly doped n-Si) เป็นบริเวณรับแสงมีค่า ρ_{Sheet} อยู่ในช่วง $50 \Omega/\text{Sq}$ ถึง $200 \Omega/\text{Sq}$ เพื่อให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินมากขึ้น และให้มีค่าเหมาะสมเพื่อลดผล Dead layer ที่ผิว ทำให้กระแสตัวจกรสูงขึ้น
2. บริเวณที่มีปริมาณสารเจือสูง (Heavily doped n^{++} -Si) เป็นบริเวณได้ขั้วไฟฟ้าโลหะเงินมีค่า ρ_{Sheet} น้อยกว่า $50 \Omega/\text{Sq}$ เพื่อให้เกิดสมบัติโอห์มมิก (Ohmic contact) ที่ดีส่งผลให้ R_c มีค่าน้อยทำให้ได้แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น และให้ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) สูงขึ้น



รูปที่ 1.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter Solar cell, SE cell)

การแพร่สารเจือ 2 บริเวณนี้แสดงดังรูปที่ 1.2 จากแนวคิดนี้ได้นำไปสู่การพัฒนา SE cell ที่มีต้นทุนต่ำและสอดคล้องกับเทคนิคที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม เพื่อนำไปสู่การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพ 19% ในการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 สังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นของสารเจือในค่าต่าง ๆ ได้เพื่อเป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง SE
- 1.2.2 ศึกษาเงื่อนไขการแพร่สารในของแข็งในขั้นตอนเดียวเพื่อลดต้นทุนและเวลาการผลิตสำหรับ SE cell
- 1.2.3 ศึกษาการใช้เทคนิค Screen printing ที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมเพื่อผลิต SE cell

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์หมึกฟอสฟอรัสที่สามารถควบคุมค่าความเข้มข้นของสารเจือได้เพื่อใช้ในการสร้าง SE cell
- 1.3.2 ศึกษาผลของการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในผลึกซิลิคอน ด้วยวิธีการใช้หมึกฟอสฟอรัสที่เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาการแพร่เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการแพร่ในขั้นตอนเดียว
- 1.3.3 ศึกษาการสร้างชั้น n-Si แบบโครงสร้าง SE ด้วยวิธีการ พิมพ์ลาย(Screen printing) ที่สอดคล้องกับการผลิตในอุตสาหกรรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ความรู้ในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ และได้ความรู้เกี่ยวกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.2 ได้ SE cell ที่สร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ลายซึ่งมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ
- 1.4.3 ได้เผยแพร่บทความระดับชาติ และระดับนานาชาติ ตามภาคผนวก จ

1.5 รูปแบบการจัดเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเขียนวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 5 บทดังนี้

บทที่ 1 ประกอบไปด้วยความสำคัญและที่มาของปัญหาในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตในการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะกล่าวถึงการดูดกลืนแสงโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน หลักการทำงานของรอยต่อ p/n-Si ข้อจำกัดของชั้นรับแสง การออกแบบขั้วไฟฟ้าด้านบน การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบ Selective Emitter ช่วงชีวิตของพาหะ และแหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์ม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสให้กับ SE cell การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion) และการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย

บทที่ 4 ได้กล่าวถึง การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin on Doped, SOD) การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si โครงสร้าง SE ด้วยการพิมพ์ลาย (Screen printing) และการสร้างโครงสร้าง SE ด้วยเทคนิคการประทับลาย (Stamp)

บทที่ 5 สรุปการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell) ต่างมุ่งเน้นถึงวิธีที่สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว เหมาะกับการผลิตในอุตสาหกรรม รวมถึงการใช้เทคนิควิธีต้นทุนต่ำ ลดกระบวนการแพร่สารเจือหลายขั้นตอน และลดขั้นตอนที่ซับซ้อนในการผลิต

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากการสืบค้นข้อมูลทางผู้ศึกษาได้ใช้ฐานข้อมูลออนไลน์ และวารสารอิเล็กทรอนิกส์ การสืบค้นงานวิจัยจากที่ต่าง ๆ นั้นได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษา พัฒนา และนำมาปรับใช้กับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Greenblatt, A.M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 1994) ได้ศึกษากระบวนการเกิดโซล-เจล ของซิลิกา-เจล (Sol-gel of Silica-gel) ที่ได้จากสารละลาย Tetraethyl orthosilicate (TEOS) จากงานวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดโซล-เจล มีอยู่ 2 ชนิด คือ เบส (Base) และกรด (acid) ลักษณะของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ซึ่งหากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสจะได้โซล-เจลที่ลักษณะเป็นรูปฟรอน และในทางกลับกันหากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะได้โซล-เจล ที่เกาะเกี่ยวเป็นสาย (Polymerization) ซึ่งส่วนผสมของโซล-เจล ประกอบไปด้วย TEOS เอทานอล (Ethanol, C_2H_5OH) และน้ำ (DI water, H_2O) ในอัตราส่วน TEOS : C_2H_5OH : H_2O เท่ากับ 1 : 2 : 0.3

Zhao, J. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 1999) ได้ศึกษาการสร้างเซลล์โครงสร้าง PERT (Passivated emitter, rear totally-diffused) ประสิทธิภาพ 24.5% บนแผ่นฐานแบบ MCZ (Magnetically-confined Czochralski grown) และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL (Passivated emitter, rear locally-diffused) ประสิทธิภาพ 24.7% บนแผ่นฐานแบบ FZ (Float zone) ซึ่งทั้ง 2 โครงสร้างประกอบไปด้วย ชั้น p-Siระมัดกลับหัว (Inverted pyramids) ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ 2 ชั้น (Double layer Antireflection coating) ชั้นออกไซด์บาง ๆ ประมาณ 200 Å (Thin oxide)

ชั้น n-Si 2 บริเวณ (Passivated emitter) ชั้น p-Si 2 บริเวณ (Rear locally-diffused) ชั้นออกไซด์ และ ขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านหลัง ด้วยโครงสร้างนี้จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง

Aberle, A.G. (ปี ค.ศ. 2000) บทบาทของการสร้างชั้นจนวนบนผิวหน้า (Surface passivation) ของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง รวมไปถึงการเปิดช่องที่ผิวของเซลล์ แสงอาทิตย์เพื่อลดผลของอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิว โครงสร้างซีเลคทีฟ (Selective) ทั้งด้าน n-Si (high-low junction) และด้าน p-Si (high-low junction) ซึ่งโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) ด้านบนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนความยาวคลื่นสั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลง พลังงานเพิ่มขึ้น

Dastgheib-Shirazi, A. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2008) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยวิธีการ เคมิแบบเปียก (Wet chemical) และใช้การแพร่เพียงครั้งเดียว จากงานวิจัยนี้ได้ทำการแพร่สารเจือ เข้มข้นสูง (Heavily doped) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (Sheet resistance, ρ_{Sheet}) เท่ากับ $30 \Omega/\text{Sq}$ และได้ทำการสกัดชั้นรับแสง (n-Si) ด้วยวิธีการ Etching back เพื่อให้ ρ_{Sheet} เท่ากับ $50 \Omega/\text{Sq}$ $100 \Omega/\text{Sq}$ และ $150 \Omega/\text{Sq}$ เพื่อเพิ่มการดูดกลืนคลื่นสั้น ส่งผลให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 18.1% จากเซลล์อาทิตย์โครงสร้างทั่วไป 17.6%

Antoniadis, H. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยหมึกซิลิคอน (Silicon ink) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printed) ซึ่งหมึกซิลิคอนประกอบด้วยผงซิลิคอน ขนาดเล็กระดับนาโนที่ผ่านการแพร่สารเจือในเข้มข้นสูง ๆ โดยนำหมึกซิลิคอนไปพิมพ์ลายบริเวณ ใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบน เพื่อให้เกิดขั้วไฟฟ้าที่ดี จากการสร้าง SE cell ด้วยวิธีดังกล่าว เซลล์แสงอาทิตย์มี ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้ถึง 19%

Röder, T.C. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการปรับปรุงด้วย วิธีการใช้เลเซอร์ทำการแพร่สารเจือบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า ซึ่งแสงเลเซอร์ที่ใช้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 532 nm ความถี่ของสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 20 kHz และใช้ระยะเวลาเท่ากับ 65 ns ซึ่งชั้น n-Si มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ $110 \Omega/\text{Sq}$ และชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแสงเลเซอร์มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ $11 \Omega/\text{Sq}$ จากการสร้าง SE cell ด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 18.0%

Tang, Y. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเตรียมสารละลายสำหรับการแพร่ สารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si ด้วยวิธีเคลือบสารละลายแบบหมุนเหวี่ยง (Spin-on doping method, SOD) สารละลายประกอบไปด้วย Tetraethyl orthosilicate (TEOS) น้ำ (DI water, H_2O) และเอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ในอัตราส่วนเท่ากับ $\text{TEOS} : \text{H}_2\text{O} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 10 : 20 : 3$ หลังจากนั้นเติมกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) ในอัตราส่วนระหว่าง

TEOS : H_3PO_4 โดยศึกษาอุณหภูมิการแพร่ที่อยู่ในช่วง 750 ถึง 950 °C และเวลาการแพร่ 10 ถึง 120 นาที จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของ H_3PO_4 ระหว่าง 1.5 : 1 ถึง 6 : 1 ส่งผลกับค่า ρ_{Sheet} ให้ค่าอยู่ระหว่าง 1 Ω/Sq ถึง 1000 Ω/Sq ที่อุณหภูมิ 950 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ ก็ส่งผลกับค่า ρ_{Sheet} เช่นเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจะทำให้ค่า ρ_{Sheet} มีค่าต่ำลง

Lee, E. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ SE cell โดยใช้หน้ากากป้องกันออกไซด์ เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือลงในบริเวณที่ไม่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างหน้ากากป้องกันการแพร่โดยเปิดช่องบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าและแพร่ให้ได้ค่า ρ_{Sheet} อยู่ในช่วง 20-30 Ω/Sq หลังจากนั้นทำการล้างชั้นออกไซด์แล้วสร้างหน้ากากครั้งที่ 2 เพื่อเปิดช่องแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำลงบนชั้นรับแสงให้ได้ค่า ρ_{Sheet} อยู่ในช่วง 80-100 Ω/Sq การสร้างหน้ากานี้อาศัยกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography process) จากผลพบว่า SE cell มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 19.0%

Jäger, U. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) ของการแพร่สารเจือเข้มข้นสูงสำหรับ SE cell จากงานวิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยทำการแพร่สารเจือในเข้มข้นสูง ให้ค่า ρ_{Sheet} มีค่าอยู่ในช่วง 19 Ω/Sq ถึง 26 Ω/Sq จากการทดสอบประสิทธิภาพควอนตัมพบว่าที่ค่า ρ_{Sheet} ที่ 19 Ω/Sq ให้ค่า QE ต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินได้ต่ำ และเมื่อเพิ่มค่า ρ_{Sheet} ทำให้ QE เพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น

Song, K. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2012) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยวิธีการสกัดชั้น n-Si (Etch barrier or Etching back) ด้วยสารเคมี โดยใช้ กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF) และกรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) มีอัตราส่วนระหว่าง HF : HNO_3 เท่ากับ 200 : 1 และ 100 : 1 ตามลำดับ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการแพร่สารเจือมีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 30 Ω/Sq มาแช่ในสารละลาย HF : HNO_3 ตามเวลาที่กำหนด พบว่าเมื่อเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ρ_{Sheet} เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของพื้นผิวที่ถูกสกัดมีลักษณะเรียบเหมือนกับแผ่นฐานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ Etching back

Zhong, S. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell จากสารละลายฟอสฟอรัส (Phosphorus ink) พิมพ์ลายลงบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si บนบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการแพร่สารเจือ ทำให้บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ามีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 30 Ω/Sq และบริเวณรับแสงมีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 70 Ω/Sq ซึ่งการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้สามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 19.1%

Jeong, K.T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการใช้สารละลาย ฟอสฟอรัสฟิมพ์ลายลงบนแผ่นซิลิคอนชนิด p-Si ที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า จากนั้นผ่านกระบวนการ แพร่สารเจือ 3 ขั้นตอนประกอบด้วย Drive-in ที่ 840 °C นาน 15 นาที เพื่อแพร่สารเจือเข้มข้นสูงที่ บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (Heavily doped area) และปล่อยให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอน Pre-deposition ที่ 790 °C นาน 20 นาที และขั้นตอน Drive-in ที่ 810 °C นาน 10 นาที เป็นขั้นตอน ของการแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำที่บริเวณรับแสง (Lightly doped area) ให้มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 100 Ω/Sq และบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 50 Ω/Sq ซึ่งการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้มี ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 17.4%

Kim, M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการใช้เลเซอร์และการสักรั้วชั้น n-Si เพื่อ สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงโครงสร้าง SE ในงานวิจัยนี้สร้างชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า ($n^+-\text{Si}$) โดยการใช้เลเซอร์ยิงลงบนบริเวณดังกล่าวให้มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 40 Ω/Sq ให้มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 32 Ω/Sq ที่บริเวณ SE จากนั้นนำไปจุ่มสารละลายเพื่อสักรั้วชั้นรับแสงให้มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 120 Ω/Sq ซึ่งจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีดังกล่าว SE cell สามารถมีประสิทธิภาพการ แปลงพลังงานถึง 19.2%

Lin, D. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังบางบริเวณ โดยการเล็อบสารละลายโบรอน แล้วแพร่สารโดยใช้แสงเลเซอร์ เพื่อให้เกิด $p^+-\text{Si}$ จากนั้นสร้าง บริเวณ SE โดยการเคลือบสารละลายฟอสฟอรัส แล้วแพร่สารเจือด้วยแสงเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ ใช้แสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 w ใช้แสงความยาวคลื่น 404 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.5 m/s สำหรับการแพร่โบรอนด้านหลัง และแสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 w ใช้แสงความ ยาวคลื่น 981 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 4.0 m/s สำหรับการแพร่ฟอสฟอรัส ด้วยโครงสร้าง SE cell ที่สร้างขึ้นนี้ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงถึง 20.0%

Dullweber, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ได้ศึกษาผลของกระแสไอออนที่เท่ากับ 22 fA/cm² เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ PERC ในอุตสาหกรรม ที่มีประสิทธิภาพการแปลง พลังงาน 22 % โดยใช้วิธีการสร้างด้วยวิธี Gas Phase Etch Back (GEB) ในการสักรั้วบริเวณรับแสงที่ มีความเข้มข้นของสารเจือสูง ซึ่งจะสกัดออกประมาณ 40 nm จะได้ค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 150 Ω/Sq จาก การสร้างเซลล์ในงานวิจัยนี้จะได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงเท่ากับ 21.6%

ตารางที่ 2.1 แสดงสรุปวิธีการสร้าง SE cell และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการเตรียมสารละลายที่จะใช้เป็นสารเจือสำหรับการแพร่ บริเวณชั้นรับแสง (n-Si) และสร้างบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า ($n^+-\text{Si}$) ในการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ทำให้มี

แนวคิดและแนวทางการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ ไม่พึ่งพาเทคนิคเลเซอร์และกระบวนการ Photolithography

ตารางที่ 2.1 เทคนิควิธีที่ใช้สร้าง SE cell

คณะผู้วิจัย	$\eta(\%)$	วิธีที่ใช้สร้าง(SE)
Kim et al.(2014)	19.2	Laser process
Röder et al.(2010)	18.0	
Lee et al.(2011)	19.0	
Lin et al.(2014)	20.0	
Tang et al.(2011)	-	Sol-gel process
Greenblatt et al.(1994)	-	
Dastgheib-Shirazi et al.(2008)	18.1	Etch Back process
Song et al.(2012)	18.1	
Kim et al.(2014)	18.2	
Dullweber et al.(2016)	21.6	
Lee et al.(2011)	19.0	Screen printed
Antoniadis et al.(2010)	18.9	
Zhong et al.(2013)	19.13	

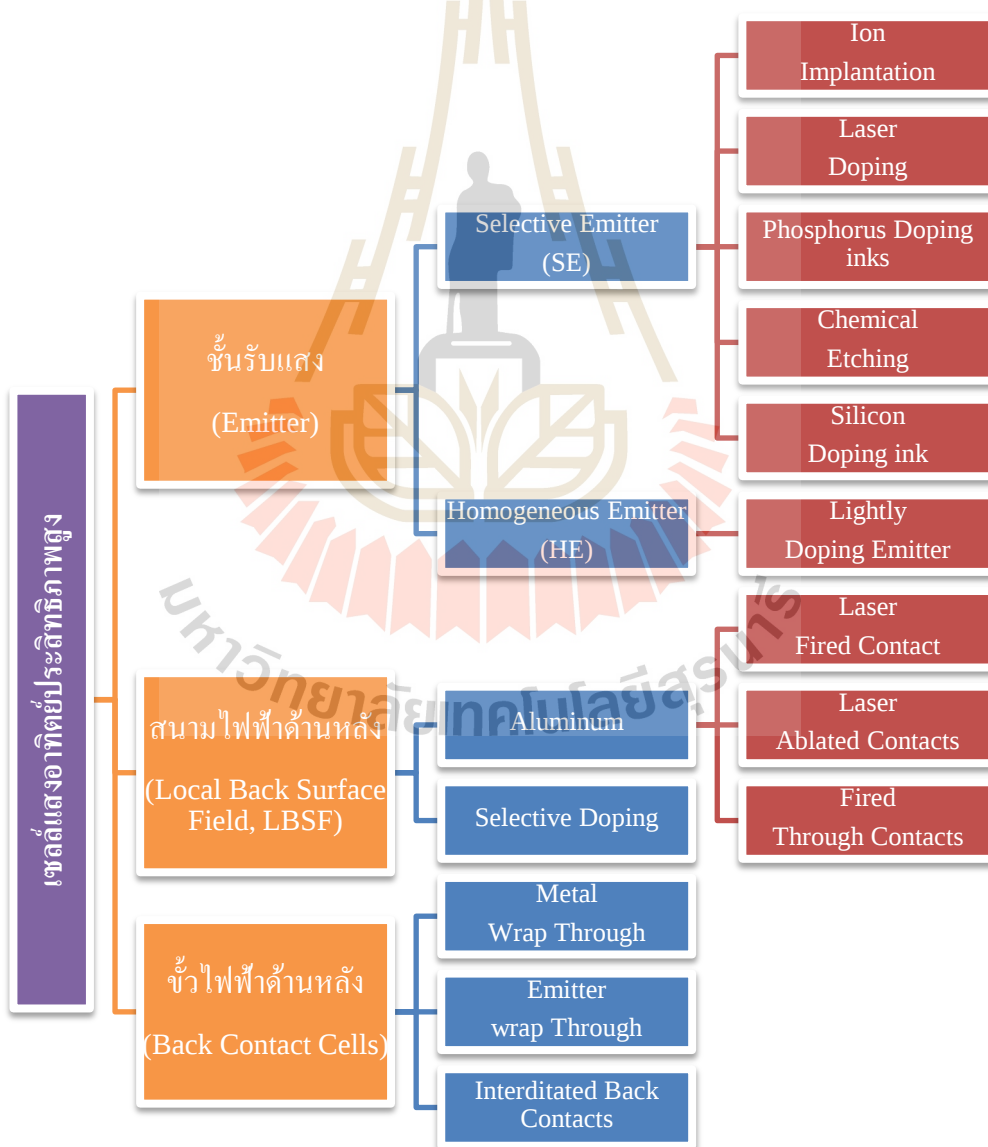
จากการสืบค้นข้อมูลจากที่ต่าง ๆ ทำให้เข้าใจถึงการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จากส่วนประกอบหลัก ๆ ที่แสดงแผนภาพในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. บริเวณรับแสง (Emitter) สามารถปรับปรุงได้ 2 แบบ คือแบบที่ 1 โครงสร้าง SE เป็นการสร้างชั้นรับแสง n-Si ที่มีค่า ρ_{Sheet} แตกต่างกับ 2 บริเวณ คือบริเวณรับแสง (n-Si) และบริเวณ n^{++} -Si ได้ด้วยไฟฟ้าที่มีสารเจือเข้มข้นสูงกว่า เทคนิคที่ใช้สร้างชั้นรับแสงแบบ SE นั้นมีหลายวิธีเช่น ใช้การฝังไอออน (Ion Implantation) ใช้แสงเลเซอร์ในการแพร่ (Laser Doping) ใช้สารละลายฟอสฟอรัสในการแพร่ (Phosphorus Doping ink) ใช้การกัดผิวด้วยเคมี (Chemical Etching) และใช้หมึกซิลิคอน (Silicon Doping ink) เป็นต้น และแบบที่ 2 การแพร่แบบสม่ำเสมอ (Homogeneous Emitter, HE) คือการสร้างชั้นรับแสง n-Si ที่มีค่า ρ_{Sheet} สม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่น

2. สนามไฟฟ้าด้านหลัง (Local Back Surface field, LBSF) สามารถปรับปรุงได้ 2 แบบ คือแบบที่ 1 แบบอะลูมิเนียม (Aluminum) เป็นการใช้โลหะอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังและให้

ความร้อนที่เหมาะสมแก่อะลูมิเนียมแพร่ซึมใน Si เกิดประจุไฟฟ้าระหว่างรอยต่อ p^{++}/p ที่ขั้วไฟฟ้าด้านหลังโดยที่วิธีให้ความร้อนมีหลายวิธีเช่น ใช้แสงเลเซอร์ยิงไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้า (Laser fired contract) และใช้การให้ความร้อนผ่านขั้วไฟฟ้า (Fired Through Contacts) เป็นต้น และแบบที่ 2 เลือการแพร่บางบริเวณ (Selective Doping) วิธีนี้คล้ายกับวิธี SE คือเป็นการเลือกแพร่สารเจือที่มีความเข้มข้นสูงบางบริเวณที่ด้านหลัง (Heavily doped rear area)

3. ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (Back Contact Cells) คือการนำขั้วไฟฟ้าด้านบนย้ายมาอยู่ด้านหลังของเซลล์เพื่อลดการบดบังแสงอาทิตย์ให้กับเซลล์ สามารถปรับปรุงได้ 3 แบบ คือ ขั้วโลหะตัดผ่าน (Metal wrap Through) ขั้วรับแสงทะลุผ่าน (Emitter wrap through) และ ขั้วโลหะแบบซี่ (Interdigitated back contact)



รูปที่ 2.1 แผนภาพวิธีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง

จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ สามารถสรุปเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ดังตารางที่ 2.2 จากตารางสามารถแบ่งเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำฟิล์มบาง ยกตัวอย่างเช่น Amorphous Silicon CdTe และ CIGS เป็นต้น
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีจากวัสดุผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งปัจจุบันนิยมนำมาสร้างเป็นเซลล์
3. เซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่สร้างขึ้นจากสารอินทรีย์ (Organic)

ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์

Technology	Type	η cell	η Panel	From
Amorphous Silicon Thin Film	Flexible/Rigid	$10.2 \pm 0.3\%$	$10.2 \pm 0.3\%$	AIST
CdTe Thin Film (Cadmium Telluride)	Flexible/Rigid	$21.0 \pm 0.4\%$	$17.5 \pm 0.7\%$	First Solar
CIGS Thin Film (Copper Indium Gallium Selenide)	Flexible/Rigid	$20.5 \pm 0.6\%$	$18.7 \pm 0.6\%$	Solibro
Multi-Crystalline Silicon Cell	Conventional & SE	$20.8 \pm 0.6\%$	$18.5 \pm 0.4\%$	Panasonic HIT, rear junction
Mono-Crystalline Silicon Cell	Conventional & SE	$25.6 \pm 0.5\%$	$22.9 \pm 0.6\%$	Trina Solar
Perovskite	Flexible/Rigid	$20.1 \pm 0.4\%$	-	KRICT
Organic	Flexible/Rigid	$11.1 \pm 0.3\%$	$8.7 \pm 0.3\%$	Mitsubishi Chemical, Toshiba

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง SE cell และการสูญเสียการแปลงพลังงานจากโฟตอนในคลื่นแสงย่านต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน รวมถึงได้

กล่าวถึงวิธีการสูญเสียการดูดกลืนโฟตอนในคลื่นแสงสีน้ำเงิน ด้วยชั้น n-Si ให้มีค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจืออย่างเหมาะสม และเกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่ชั่วไฟฟ้าที่ดีด้วยการสร้าง SE cell

2.3.1 การดูดกลืนแสงโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

ปัจจุบันวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน นิยมนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งมีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 1.12 eV และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุซิลิคอนมีค่าการเปลี่ยนแปลงตามแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ตกกระทบผิวซิลิคอนแสดงในรูปที่ 2.2 จากความสัมพันธ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุซิลิคอนในพื้นที่ 1 cm^{-1} มีค่าอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 nm ถึง 1100 nm ซึ่งเป็นช่วงที่คลื่นแสงของพระอาทิตย์ที่มีพลังงานโฟตอนสูงสังเกตได้จากภาพที่ 2.5 จึงทำให้วัสดุซิลิคอนเหมาะกับการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพื้นที่สี่เท่าคือสเปกตรัมของแสงที่ตกลงบนผิวโลกที่สมมติแบบ AM1.5 อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนสามารถแปลงพลังงานได้เพียงช่วงแสงความยาวคลื่นต่ำกว่า 1127 nm และสูญเสียสูงถึง 35% เนื่องจากการสูญเสียเชิงความร้อน ค่าการสูญเสียการแปลงพลังงานแสงแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงสเปกตรัมแสงอาทิตย์และย่านแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดไม่เกิน 45%

ความยาวคลื่นแสงมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงาน แสดงในสมการที่ (2.1)

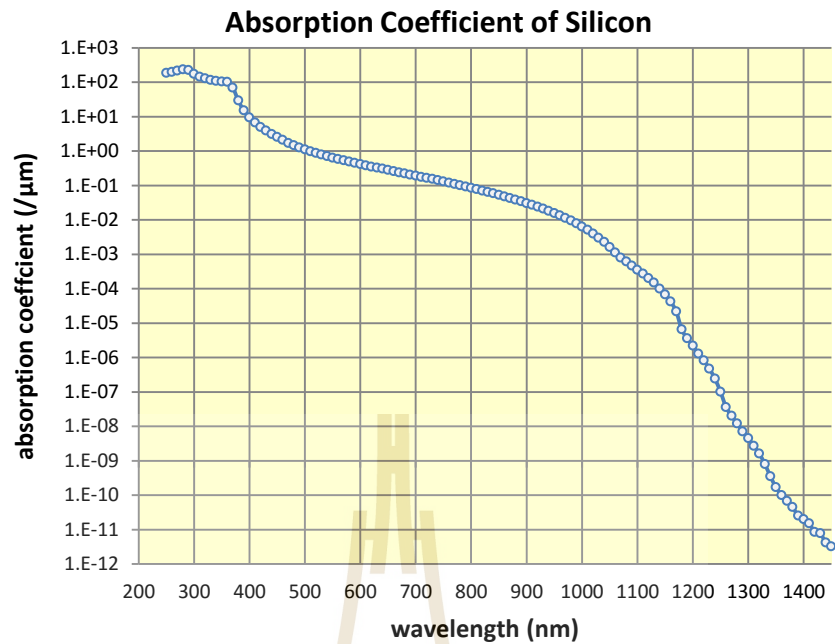
$$E_{(ev)} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) เท่ากับ $4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

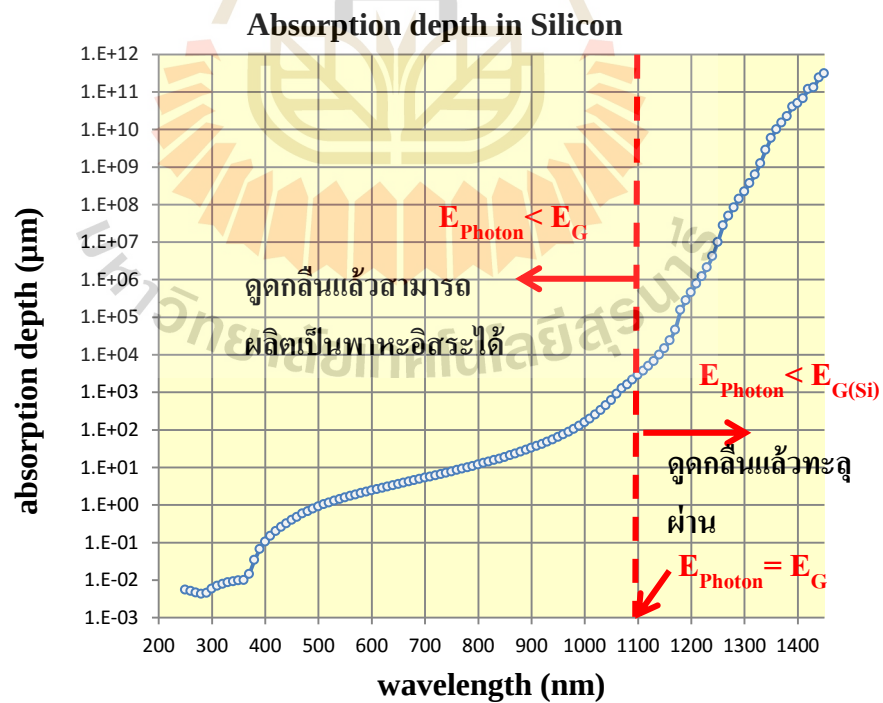
ν คือค่าความเร็ว

c คือค่าความเร็วแสงเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

λ คือความยาวคลื่น (nm)

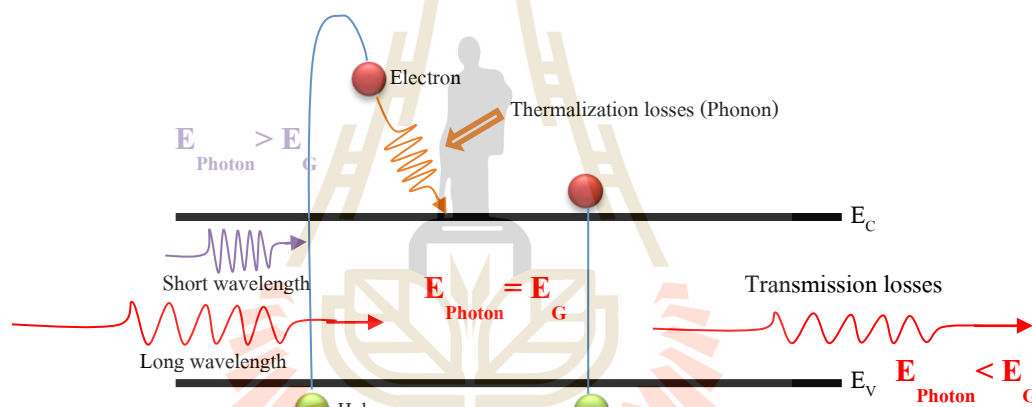


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุซิลิคอนภายใต้แสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ตกกระทบผิววัสดุ (<http://pveducation.org>)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าความลึกของการดูดกลืนแสงของวัสดุซิลิคอนภายใต้แสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่ตกกระทบผิววัสดุ (<http://pveducation.org>)

รูปที่กราฟ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงที่ตกกระทบผลึกซิลิคอน (c-Si) ที่เกิดขึ้นได้ในระยะความลึกต่าง ๆ จากกราฟพบว่าช่วงคลื่นแสงที่มีพลังงานมากกว่า 1.12 eV ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นสั้น ที่ความลึกจากผิว 1000 μm ซิลิคอนสามารถดูดกลืนแสงและสามารถผลิตพาหะอิสระได้ ที่ช่วงความยาวคลื่นสั้นนั้นผลึกซิลิคอนสามารถดูดกลืนได้ในระยะสั้น ๆ จากผิว จึงทำให้วัสดุซิลิคอนนั้นสูญเสียการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นสั้น ในทำนองเดียวกันผลึก Si สามารถดูดกลืนความยาวคลื่นยาวที่ระยะลึกลงไปได้ เมื่อนำวัสดุทั้งตัวนำซิลิคอนไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้เวลาความหนาเซลล์ไม่เกิน 1000 μm หรืออยู่ในอุตสาหกรรมไม่เกิน 300 μm ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีชั้นรับแสง (n-Si) บาง เพื่อให้เกิดรอยต่อ p/n-Si ขึ้น ๆ หนาประมาณ 0.5 μm ถึง 1.5 μm เพื่อให้สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 480 nm ถึง 600 nm ได้ดี เนื่องจากย่านนี้มีความเข้มแสงสูงสุด



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดกลืนแสงของซิลิคอนด้านรับแสงจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนวัสดุและการสูญเสียที่เกิดขึ้น

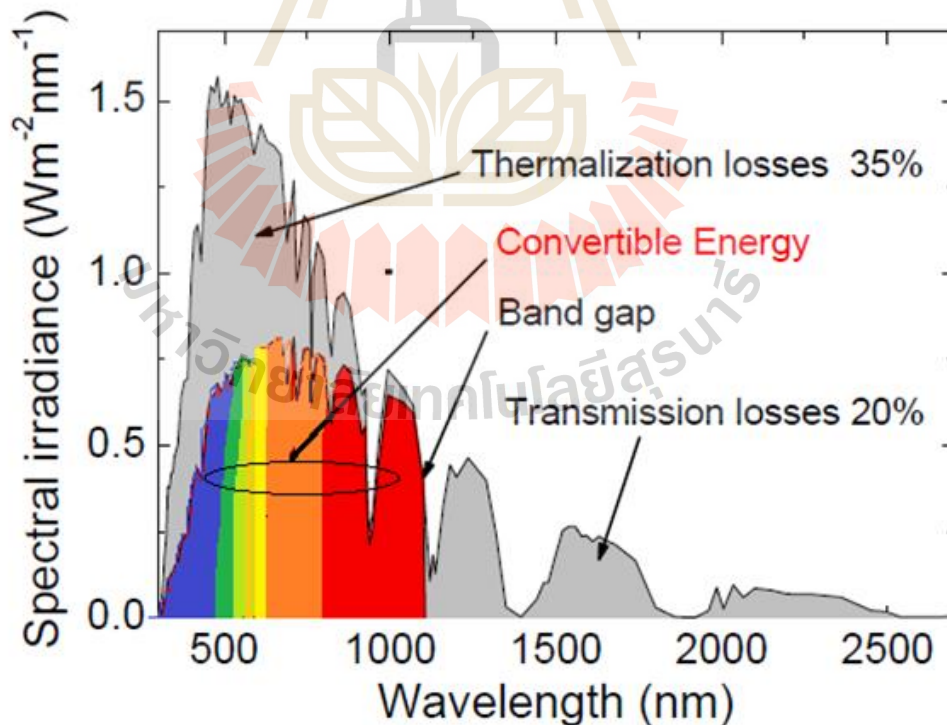
จากการสูญเสียดังกล่าวสามารถอธิบายในรูปของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.4 กลไกการสูญเสียการแปลงพลังงานเมื่อถูกกระตุ้นจากแสงอาทิตย์ แบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

1. เกิดจากแสงตกกระทบมีพลังงานสูงกว่าแถบช่องว่างพลังงานซิลิคอน ($E_{ph} > E_{G(Si)}$) ที่ชั้นรับแสง n-Si จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในชั้นแถบความนำ (Conduction band, E_C) สูงกว่าขอบพลังงาน E_C อิเล็กตรอนจะคายพลังงานที่เรียกว่าโฟนอน (Phonon) หรือการสูญเสียเชิงความร้อน (Thermalization losses) เพื่อให้อิเล็กตรอนตกกลับลงมาระดับขอบของพลังงาน E_C และเดินทางในวัสดุได้ ดังนั้นรอยต่อ p/n-Si จึงเกิดการสูญเสียเชิงความร้อนในช่วงย่านพลังงานสูง

กว่า $E_{G(Si)}$ ซึ่งการสูญเสียในช่วงความยาวคลื่นสั้นนี้คิดเป็น 35% ของการแปลงพลังงานทั้งหมด เมื่อชั้น n-Si มีสารเจือปนปริมาณสูง ทำให้ผลของโฟนอนมีอิทธิพลต่อการลดลงของพาหะอิสระอย่างมาก จากกลไกการชนกันของพาหะ (Collision effect)

2. เกิดจากแสงตกกระทบมีพลังงานน้อยกว่าแถบช่องว่างพลังงานซิลิคอน ($E_{ph} < E_{G(Si)}$) คือการสูญเสียการแปลงพลังงานในช่วงความยาวคลื่นยาว เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนมีแถบช่องว่างพลังงาน (E_G) เท่ากับ 1.12 eV ถ้าแสงมีพลังงานต่ำกว่า 1.12 eV หรือเป็นค่าความยาวคลื่นสูงกว่า 1100 nm วัสดุซิลิคอนจะไม่สามารถดูดกลืนแสงได้ เกิดการทะลุผ่านแสง (Transmission loss) ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์ไม่ได้รับการกระตุ้นให้อิสร่ที่ชั้นแถบนำไฟฟ้า (E_C) ได้ จึงไม่เกิดพาหะเคลื่อนที่และไม่เกิดกระแสไฟฟ้าในที่สุด การสูญเสียจากการทะลุผ่านแสงคิดเป็น 20% ของพลังงานแสงทั้งหมด

3. เกิดจากแสงตกกระทบมีพลังงานเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานซิลิคอน ($E_{ph} = E_{G(Si)}$) เนื่องจากโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ 1.12 eV ซึ่งเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน ดังนั้นความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงนี้จึงมีประสิทธิภาพสูง ไม่เกิดการสูญเสียเชิงความร้อน หรือการทะลุผ่าน



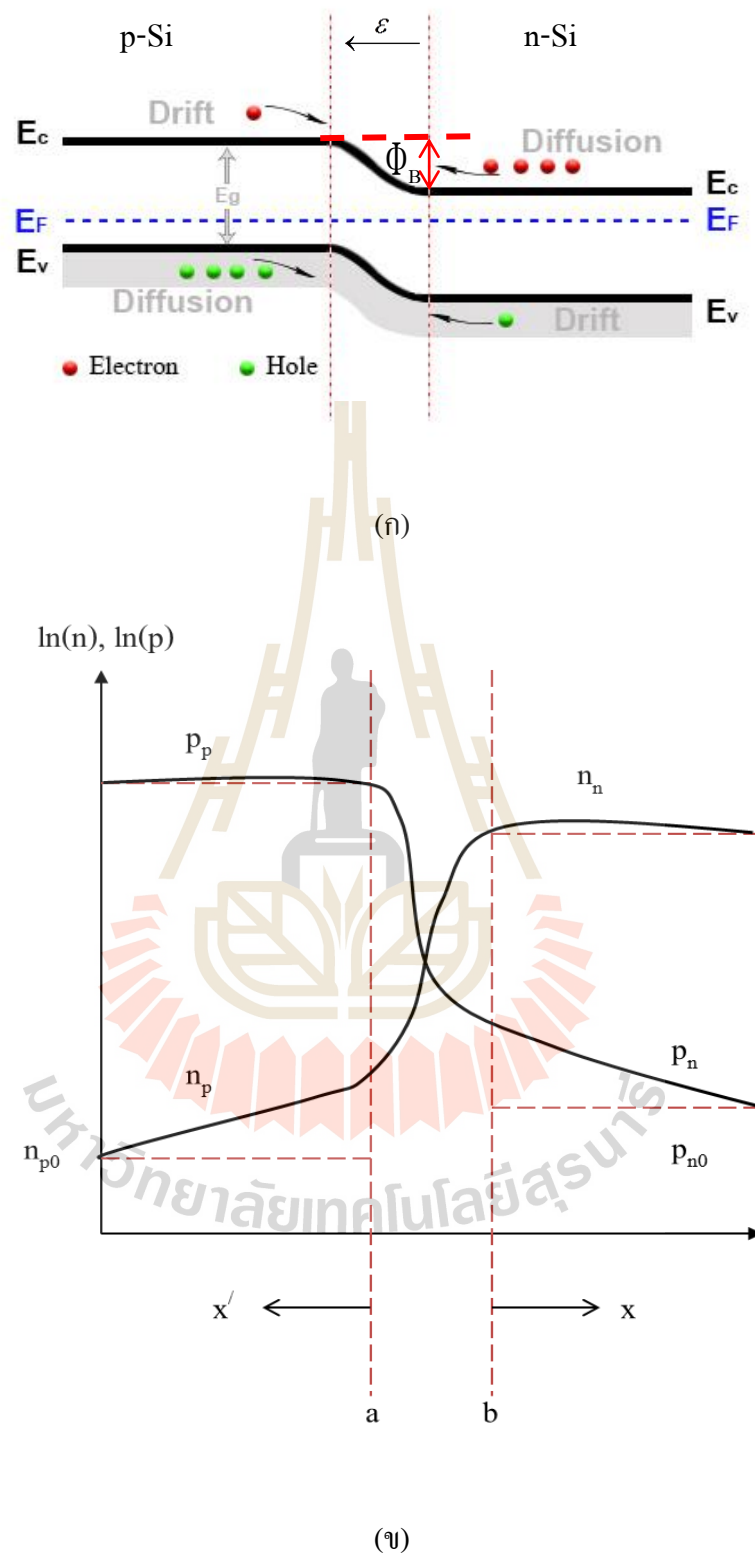
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมแสงอาทิตย์และย่านแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ใช้แปลงพลังงานเป็นไฟฟ้า

ดังนั้นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีชั้นรับแสงที่มีสารเจือปนเหมาะสมสามารถปรับปรุงการแปลงพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นสั้นให้ได้มากขึ้นได้ เพื่อลดผลการชนกันของพาหะทำให้เกิดกระแสโฟโตมากขึ้นที่ย่านแสงคลื่นสั้น

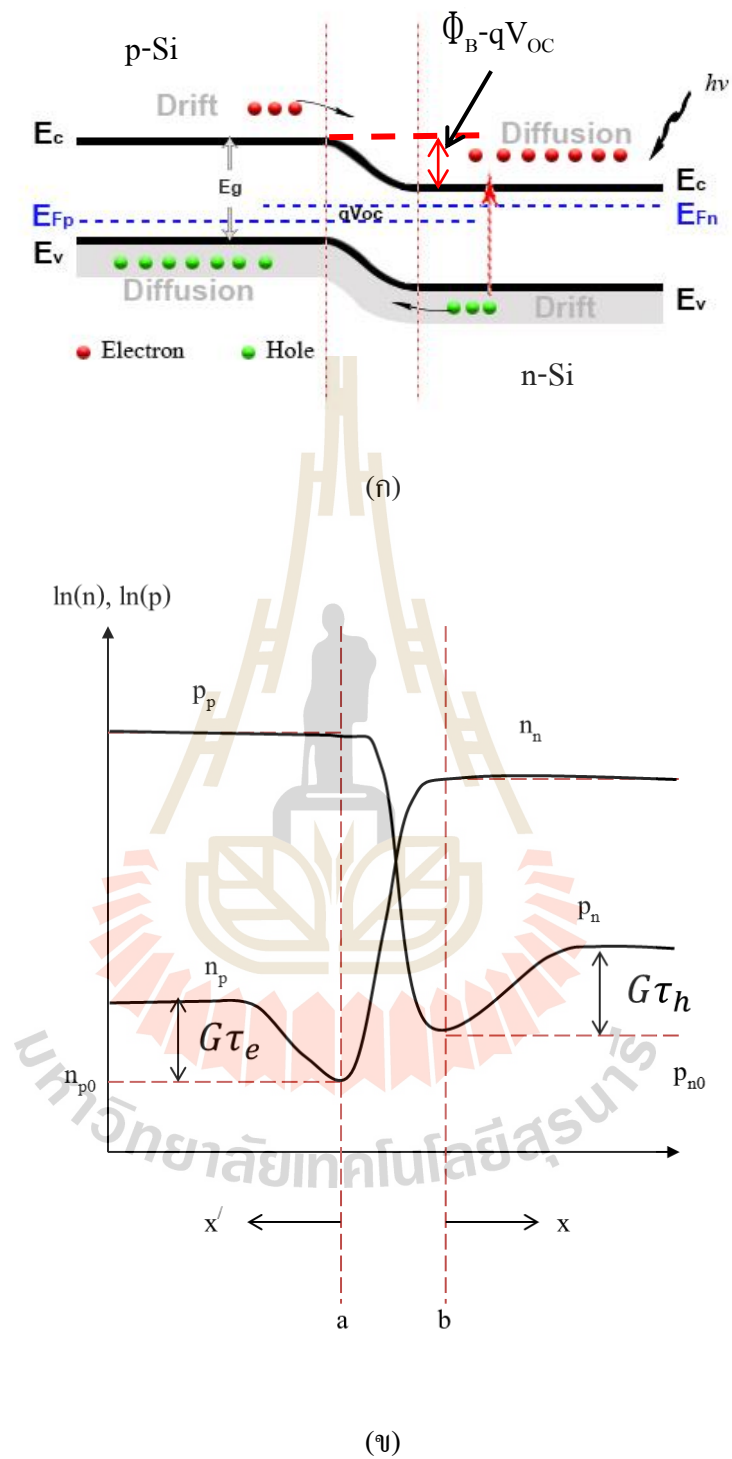
2.3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si

วัสดุสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si ได้รับแสงจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ซึ่งสามารถแปลงพลังงานแสงตกกระทบให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นปัจจุบันจึงนิยมนำสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับไดโอด (Diode) เป็นโครงสร้างรอยต่อ p/n-Si โดยเติมสารเจือหมู่ 3 ที่ชั้น p-Si และหมู่ 5 ที่ชั้น n-Si เพื่อให้เกิดประจุที่รอยต่อปลอดพาหะ และพาหะโฮลและอิเล็กตรอนที่ชั้น p-Si และ n-Si ตัวอย่างเช่นเมื่อเติมธาตุสารเจือหมู่ 5 ฟอสฟอรัส (P) ลงในธาตุหมู่ 4 ซิลิคอน (Si) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนพาหะข้างมาก ซึ่งเรียกอะตอมสารเจือหมู่ 5 นี้ว่าอะตอมผู้รับ (Donor) และเรียกสารกึ่งตัวนำนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิด n-Si (n-type) ในกรณีเดียวกันถ้าหากเติมธาตุสารเจือหมู่ 3 โบรอน (B) ลงในธาตุหมู่ที่ 4 ซิลิคอน จะทำให้เกิดโฮลเป็นพาหะข้างมาก เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด p-Si ดังนั้นเมื่อนำวัสดุสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si มาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แล้วสามารถพิจารณาได้ 2 กรณีแสดงดังรูปที่ 2.6

1. เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si อยู่ภายใต้ที่มีดหรือสภาวะสมดุล แสดงแถบพลังงานดังรูปที่ 2.6 (ก) จากรูปรอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีดนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รอยต่อ ให้เกิดกำแพงศักย์ภายใน (Φ_B)ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพาหะอิเล็กตรอนและโฮล จึงทำให้เกิดสภาวะสมดุลขึ้น เนื่องจากการแพร่ (Diffusion) ของอิเล็กตรอนด้าน n-Si ไปด้าน p-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน และการแพร่ของโฮลจากด้าน p-Si ไปด้าน n-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งการแพร่และการพัดพาของพาหะทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้าม จึงทำให้กระแสรวมของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นมีค่าเป็นศูนย์ และการกระจายตัวของพาหะข้างน้อยแต่ละด้านของอุปกรณ์รอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีดแสดงดังรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 (ก) แถบพลังงานรอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีด (ข) กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ภายใต้ที่มีด



รูปที่ 2.7 (ก) แถบพลังงานรอยต่อ p/n-Si ภายใต้แสงตกกระทบ (ข) กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ภายใต้แสงตกกระทบ

2. เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ภายใต้แสงตกกระทบบ เมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงหรือโฟตอน ซึ่งมีพลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน จากรูปที่ 2.7 (ก) พบว่ารอยต่อ p/n-Si อยู่ในสภาวะไม่สมดุลเกิดกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ $\Phi_B - qV_{OC}$ ดังนั้นศักย์ภายในที่เป็นผลต่างระหว่าง $E_{Fn} - E_{Fp} = qV_{OC}$ สนามไฟฟ้าภายในหรือศักย์ไฟฟ้าภายในนี้จะผลักให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้าน n-Si และตรงข้ามกับโฮลถูกผลักไปด้าน p-Si ในภาวะภายใต้แสงจะเกิดพาหะส่วนเกินของโฮล Δp และอิเล็กตรอน Δn จากการผลิต จากโฟตอนเกิดขึ้นที่ฝั่ง n-Si และ p-Si ตามลำดับ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เกิดกระแสไฟฟ้าจากผลรวมของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลส่วนเกินทางด้าน n-Si และจากผลรวมของพาหะโฮลและพาหะอิเล็กตรอนส่วนเกินทางด้าน p-Si และลักษณะการกระจายตัวของพาหะข้างน้อยภายใต้แสงตกกระทบบแสดงดังรูปที่ 2.7 (ข)

ดังนั้นจากพฤติกรรมข้างต้น สามารถแสดงถึงลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V) ในจุดภาคที่ 4 ดังสมการที่ (2.2) แสดงรูปกราฟในรูปที่ 2.8 (ก) และได้แสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.8 (ข)

$$I_{net} = I_0 (e^{qV_{OC}/kT} - 1) - I_{ph} \quad (2.2)$$

เนื่องจาก $I_0 = A \left(\frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} \right) = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right)$ จะได้

$$I_{net} = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) (e^{qV_{OC}/kT} - 1) - I_{ph} \quad (2.3)$$

โดยที่ I_{ph} คือกระแสโฟโตหรือกระแสที่เกิดจากแสงตกกระทบบ

I_{net} คือกระแสไฟฟ้ารวม

I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse Saturation Current)

V_{OC} คือแรงดันเปิดวงจร

A คือพื้นที่หน้าตัด

q คือประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

K คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann) มีค่าเท่ากับ 1.380×10^{-23} J / K

T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (Kelvin, K)

D_e คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

- D_h คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
- n_p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ในชั้น p-Si
- p_n คือความหนาแน่นของโฮลต่อพื้นที่ในชั้น n-Si
- n_i คือความหนาแน่นของพาหะ
- L_e คือระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน ($L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$)
- L_h คือระยะทางการแพร่ของโฮล ($L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$)
- N_A คืออะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor)
- N_D คืออะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor)

พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย

1. กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current, I_{SC}) I_{SC} คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในทางอุดมคติ V เท่ากับ 0 จะทำให้ I_{SC} มีค่าเท่ากับ I_{ph} ดังนั้น I_{SC} มีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้แสงตกกระทบโดยตรง
2. แรงดันเปิดวงจร (Open Voltage Circuit, V_{OC}) V_{OC} คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์เท่ากับศูนย์ (I_{net}) โดยที่แรงดันเปิดวงจรนั้นเพิ่มขึ้นตามแสงตกกระทบแบบอัลกอลิทึม แสดงดังสมการที่ (2.4)

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) พบว่า I_0 มีผลต่อ V_{OC} อย่างมาก ถ้า I_0 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ V_{OC} ลดลงมาก เนื่องจากความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว (Surface recombination velocity) สูงขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับกระแสอิมิตัวย้อนกลับ ถ้าความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวมีค่าต่ำจะทำให้ I_0 มีค่าต่ำด้วย และจะส่งผลให้ V_{OC} เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3. ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) สามารถบอกถึงคุณภาพรอยต่อ p/n-Si และความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมภายในเซลล์ (Series resistance, R_s) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของขั้วไฟฟ้า และสามารถบ่งบอกความถี่เหลี่ยมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งถ้า FF มีค่าเข้าใกล้ 1 กราฟจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมากขึ้น ซึ่งสมการ FF ได้แสดงในสมการ (2.5)

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2.5)$$

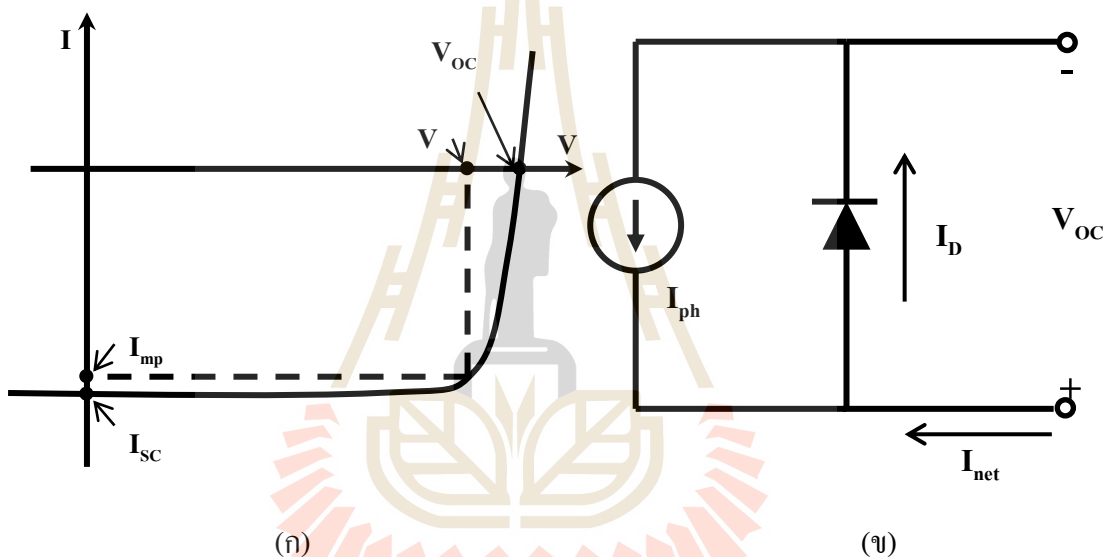
โดยที่ V_{mp} คือแรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

I_{mp} คือกระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (The energy conversion efficiency, η) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$\eta = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \times I_{SC} FF}{P_{in}} \quad (2.6)$$

โดยที่ P_{in} กำลังไฟฟ้าอินพุตหรือกำลังงานทั้งหมดที่ได้จากแสง

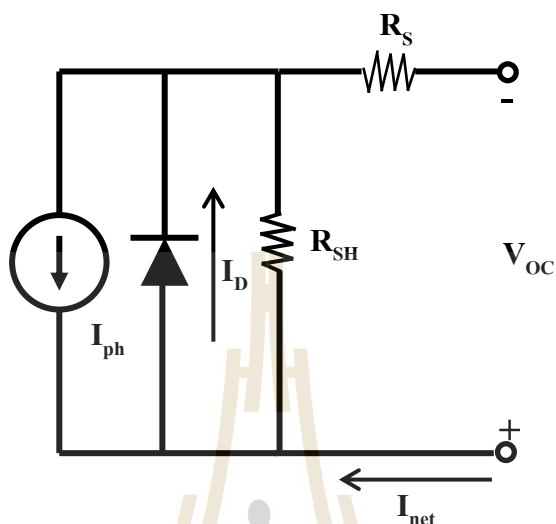


รูปที่ 2.8 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้แสงตกกระทบบ (ข) วงจรสมมูลอุดมคติของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงตกกระทบบ

เซลล์แสงอาทิตย์ขณะใช้งานจะพบค่าความต้านทานแฝงขึ้นภายใน ประกอบด้วย

1. ค่าความต้านทานที่รอยต่อ p/n-Si หรือที่เรียกว่าความต้านทานขนาน (Shunt resistance, R_{SH}) เนื่องจากมีกระแสไหลผ่านจุดเชื่อมรอยต่อ p/n-Si ถ้า R_{SH} มีค่ามากเป็นการบอกถึงคุณภาพของรอยต่อ p/n-Si ที่มีจุดบกพร่องที่ผิวระหว่างรอยต่อ p/n-Si น้อย
2. ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_S) เกิดจากผลรวมของความต้านทานเนื้อสาร และที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและเป็นชั้นรับแสง หรือรอยสัมผัสระหว่างชั้นป้องกันการสะท้อนแสง เป็นต้น

จากค่าความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูล แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าความต้านทานภายใน

2.3.3 ข้อจำกัดของชั้นรับแสง (n-Si)

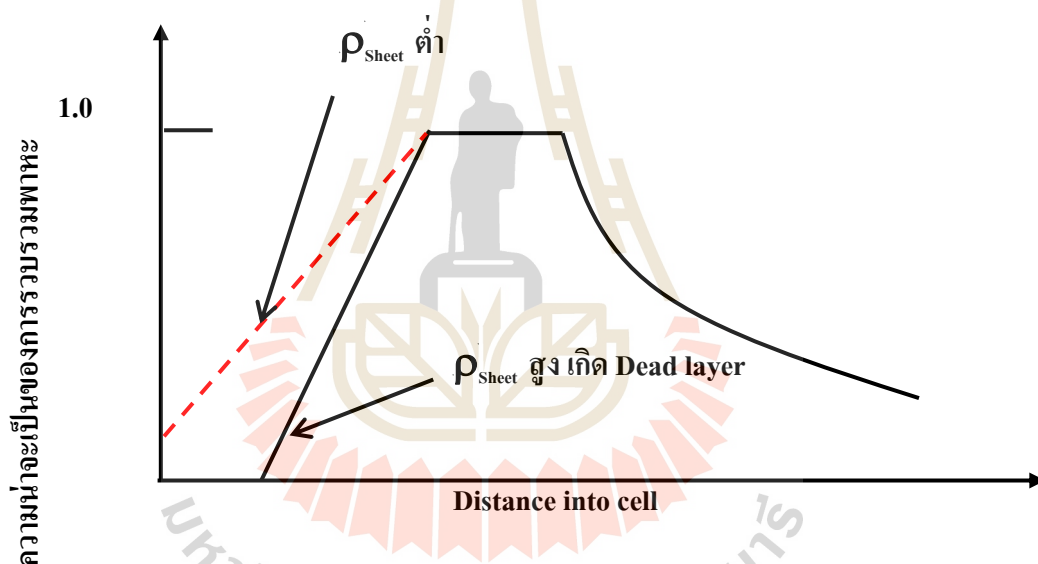
2.3.3.1 Dead layer คือบริเวณที่ไม่มีพาหะเหลืออยู่เลย เนื่องจากพาหะที่ผลิตได้ เกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีความเร็วสูงที่ผิวด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ลดผลของ Dead layer จึงต้องออกแบบปริมาณการแพร่ของชั้นรับแสงให้ดีที่สุด นั่นคือชั้นรับแสงนั้นบางที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และให้ได้ค่าความต้านทานจำเพาะแผ่นที่ต่ำมากที่สุด ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในปี ค.ศ. 1960 ได้เลือกใช้ความลึกของชั้นรับแสงประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อให้ได้ความลึกตามที่ต้องการและให้ค่าความต้านทานจำเพาะแผ่นมีค่าต่ำมากที่สุด และความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะที่ผิวที่เกิดจาก Dead layer แสดงดังรูปที่ 2.10

จากการพิจารณาตามทฤษฎีของเกาส์เซียน (Gaussian theory) พบว่าการกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัส ภายในซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสแบบไม่จำกัดด้วยความร้อนสูงมีความหนาแน่นสูงสุดแสดงดังรูปที่ 2.11 และความสัมพัทธ์ความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสจะลดลงตามระยะความลึกในวัสดุซิลิคอน หลังจากที่ผ่านมาการแพร่ด้วยความร้อนสูง โดยที่กำหนดอุณหภูมิไว้ที่ $950\ ^\circ\text{C}$ และเปลี่ยนเงื่อนไขของเวลาในการแพร่เป็น 4 เงื่อนไข คือ 10 นาที 20 นาที 30 นาที และ 60 นาที จากกราฟแสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดของการแพร่อะตอมฟอสฟอรัสในซิลิคอน ซึ่งเกิดจากความสามารถในการหลอมละลายของวัสดุ

(Solid Solubility) ของฟอสฟอรัสในซิลิคอน ที่อุณหภูมิของการแพร่ ซึ่งหากมีอะตอมของฟอสฟอรัสในซิลิคอนมาก จะทำให้ความหนาแน่นที่ผิวไม่เกินค่าหลอมละลายของฟอสฟอรัส

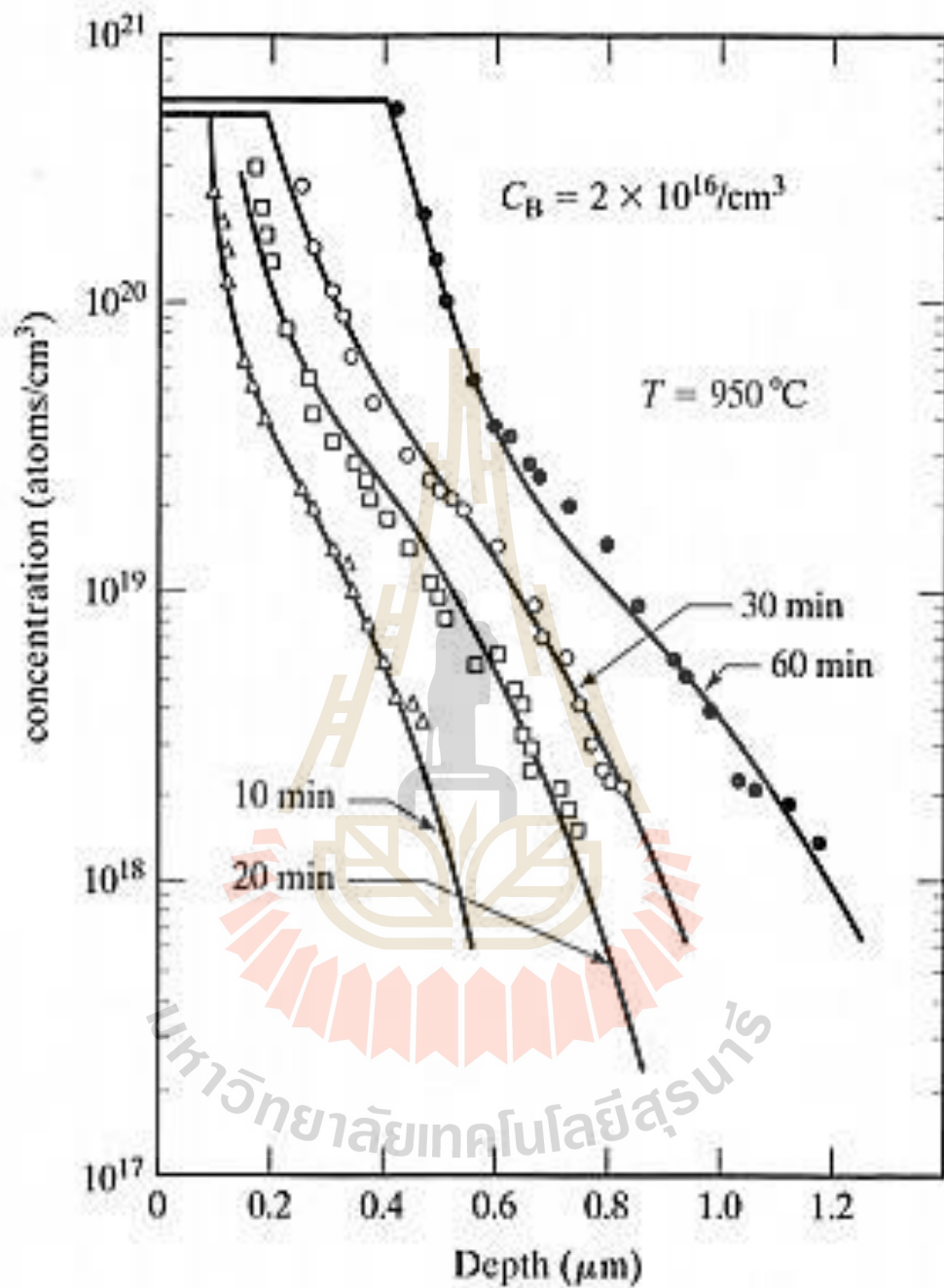
อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ที่แพร่สารเจือในชั้นรับแสงปริมาณสูง แม้ว่าจะสามารถรวบรวมพาหะได้มาก ลดผลของการเกิด Dead layer แต่ปริมาณอะตอมสารเจือสูงมาก จะส่งผลเสียต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะให้ลดลงได้ เนื่องจากเกิดอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะสูง

ดังนั้นการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจึงต้องมีความเหมาะสม เพื่อให้เกิดระยะความลึกของชั้นรับแสงและค่าความต้านทานจำเพาะแผ่นที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาของการเกิด Dead layer และให้อัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ต่ำ



ซิลิคอน (J. C. Tsai, Proceedings of the IEEE 57 (1969))

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะกับระยะความลึกของการแพร่ที่เกิด Dead layer



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสกับระยะความลึกในวัสดุ

2.3.3.2 ผลกระทบจากการแพร่สารเจือในเข้มข้นสูง (High doping effects)
ถึงแม้ว่าการสร้างชั้นรับแสง n-Si ให้มีค่า ρ_{Sheet} ต่ำจากการแพร่สารเจือเข้มข้นสูง จะสามารถลดผลของการเกิด Dead layer ได้ แต่การแพร่สารเจือในเข้มข้นสูงนั้น จะทำให้ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้าง

น้อยมีค่าต่ำ เนื่องจากการเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะแบบ Auger นอกจากนี้ข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกจากในขั้นตอนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนสูง จะเพิ่มจำนวนการรวมตัวใหม่บริเวณตรงกลางของแถบช่องว่างพลังงาน ผ่านชั้นกับดัก (Trapping levels) ซึ่งจะทำให้ค่าช่วงชีวิตของพาหะลดลง

2.3.3.3 ผลจากความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse Saturation Current Density, I_0) ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่ง จากสมการที่ (2.2) พบว่าความสัมพันธ์ของ I_0 กับอะตอมของสารเจือและค่าช่วงชีวิตของพาหะแปรผกผันกัน โดยที่ถ้าเติมอะตอมสารเจือผู้รับ (N_A) ที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูง ๆ จะทำให้ I_0 มีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามการที่เติมอะตอมสารเจือในด้านรับแสงมีค่าสูงนั้นส่งผลเสียต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะให้มีค่าต่ำมาก ซึ่งจะส่งผลให้กระแส I_0 มีค่ามากทำให้การรวบรวมกระแสบริเวณด้านรับแสงลดลง

2.3.4 การออกแบบระยะห่างขั้วไฟฟ้าด้านบน

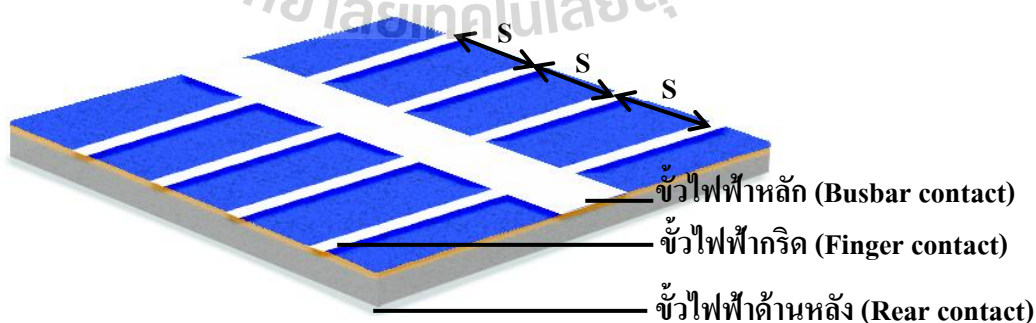
การออกแบบระยะห่างของขั้วไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการสูญเสียของการบดบังแสงจากขั้วไฟฟ้า สามารถคำนวณหาระยะห่างของขั้วไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.7)

$$P_s = \frac{\rho_s S^2 J_{mp}}{12V_{mp}} \quad (2.7)$$

โดยที่ P_s คือกำลังการสูญเสียที่รอยต่อขั้วไฟฟ้า

ρ_{Sheet} คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นด้านรับแสง

S คือระยะห่างของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 ลักษณะขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะข้อไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยข้อไฟฟ้าด้านบน (Front contact) และข้อไฟฟ้าด้านหลัง (Rear contact) โดยที่ข้อไฟฟ้าด้านบนประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

1. ข้อไฟฟ้าหลักทำหน้าที่เป็นข้อไฟฟ้าเชื่อมต่อของข้อไฟฟ้ากริด ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าข้อไฟฟ้ากริด โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้ขนาดของข้อไฟฟ้าหลักเท่ากับ $500\ \mu\text{m}$ เพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ และสายไฟเพื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน
2. ข้อไฟฟ้ากริดทำหน้าที่รวบรวมกระแสไฟฟ้าจากพาหะอิเล็กตรอนที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริเวณผิว ซึ่งจะมีขนาดเล็กประมาณ $30\ \mu\text{m}$ ถึง $50\ \mu\text{m}$ เพื่อลดการบังแสงตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์

2.3.5 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter Solar Cell)

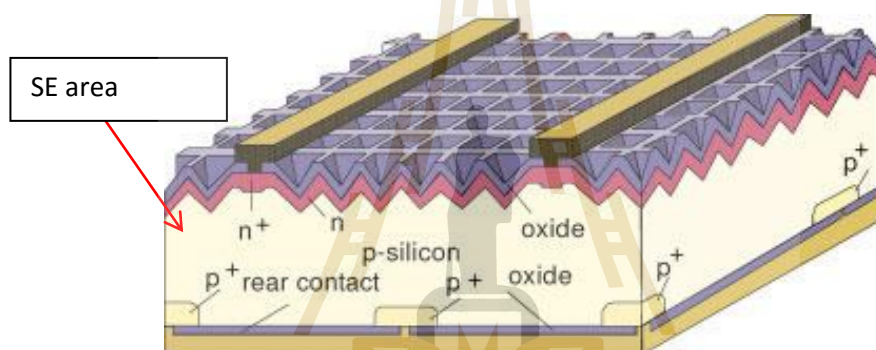
การสูญเสียการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

1. การสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination loss) ที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ได้แก่ผิวเซลล์ทั้งด้านบนและด้านหลังบริเวณรอยสัมผัส และในก้อนผลึก (Bulk Si)
2. การสูญเสียจากค่าความต้านทานแฝง (Resistance loss) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ค่า R_{SH} และ R_s ที่เกิดจากรอยต่อของอุปกรณ์รอยต่อ p/n-Si
3. การสูญเสียที่เกิดจากการบังแสง (Shadowing loss) ของข้อไฟฟ้าด้านรับแสง ที่บังบังพื้นที่รับแสง
4. การสูญเสียทางแสง (Optical loss) ที่เกิดจากแสงการสะท้อนแสงกลับที่ผิว (Reflectance, %R)

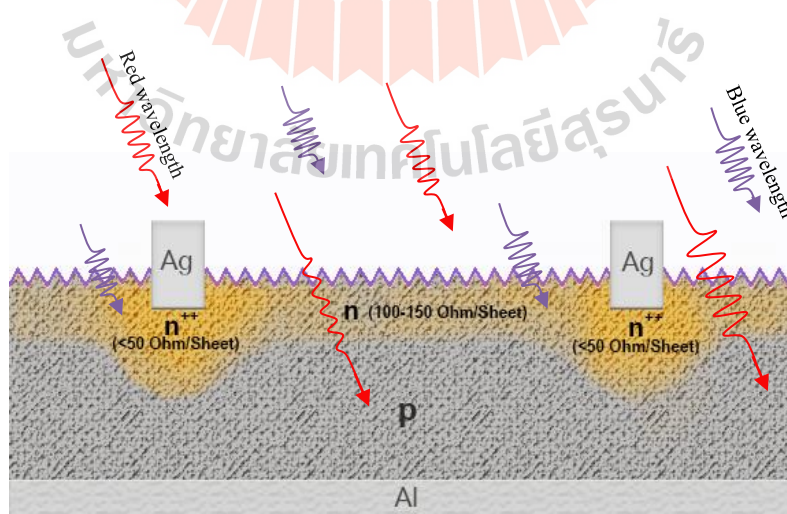
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้าง PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) ที่ให้ประสิทธิภาพสูง 25% ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบเพื่อลดผลของการสูญเสียทั้ง 4 แบบ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อพิจารณาส่วนที่ลดการสูญเสียจากการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านบนหรือชั้น n-Si พบว่าชั้นรับแสงมีความเข้มข้นของสารเจือไม่สม่ำเสมอ โดยที่บริเวณรับแสงมีความเข้มข้นสารเจือต่ำ (Lightly doped n-Si) ส่วนบริเวณใต้ข้อไฟฟ้ากริดมีความเข้มข้นของสารเจือสูง (Heavily doped n^{++} -Si) ในบริเวณดังกล่าวนี้เราเรียกว่า SE แต่กระบวนการสร้างเซลล์

แสงอาทิตย์แบบ PERL ใช้กระบวนการผลิตด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography technique)

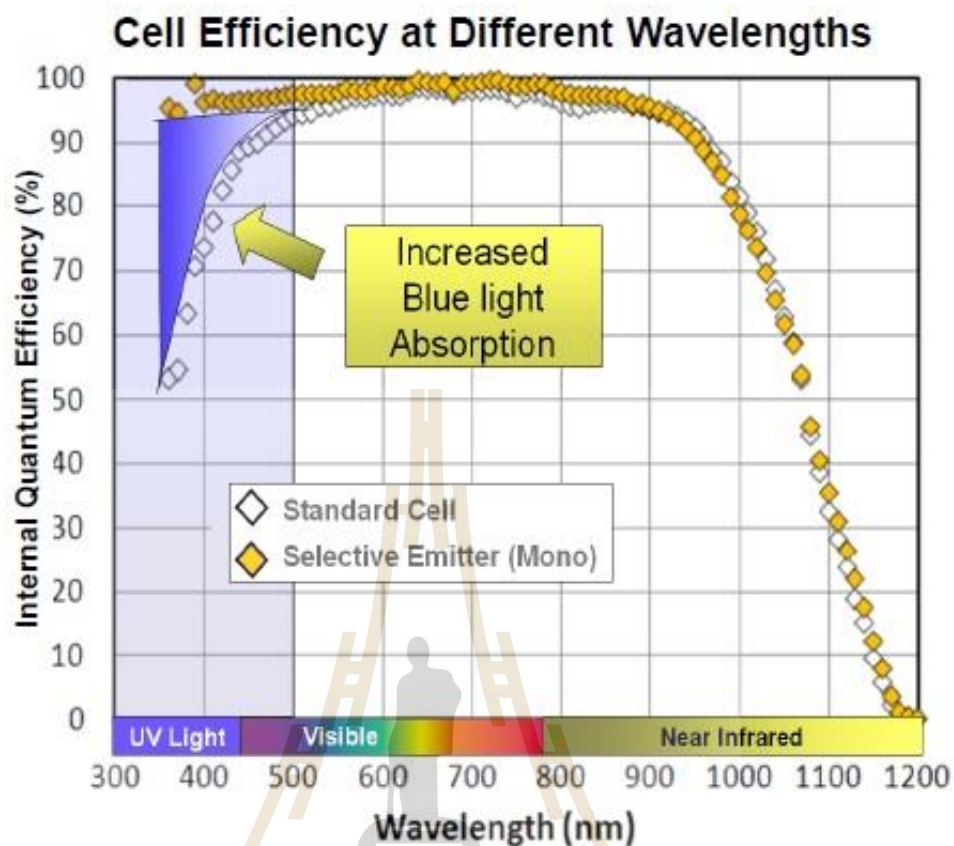
โครงสร้าง SE ประกอบด้วยชั้น n-Si ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่แตกต่างกัน 2 บริเวณดังรูปที่ 2.14 โดยที่บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณรับแสงจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นสูงอยู่ในช่วง $100\ \Omega/\text{Sq}$ ถึง $150\ \Omega/\text{Sq}$ จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือต่ำ เพื่อลดของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ย่านพลังงานโฟตอนสูงหรือเพิ่มการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินให้สูงขึ้นได้ เมื่อแสงพลังงานสูงหรือแสงสีน้ำเงินตกกระทบ และบริเวณที่ 2 เป็นบริเวณได้ขั้วไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า $50\ \Omega/\text{Sq}$ จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูง เพื่อให้สมบัติโอห์มมิกระหว่างชั้นซิลิคอนกับขั้วไฟฟ้าที่ดีเกิด R_c ค่าต่ำ



รูปที่ 2.13 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 25% (Prog. Photovolt: Res. Appl. 2009; 17:183–189)



รูปที่ 2.14 ลักษณะการดูดกลืนของแสงย่านความยาวคลื่นสั้นและยาว เกิดขึ้นที่ผิวต้นและลึกลงไปตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency) ภายใต้งานกับความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานและ SE cell (Dupont)

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) คือค่าประสิทธิภาพของการผลิตพาหะที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในเชิงหลักการพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินที่ต่ำทำให้สูญเสียการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นสั้น เมื่อสร้างบริเวณ SE ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์โดยชั้น n-Si มีค่า ρ_{Sheet} สูงกว่าแบบโครงสร้างมาตรฐาน ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินได้มากขึ้นและผลิตพาหะในย่านแสงสีน้ำเงินมาก เนื่องจากผลของการรวมตัวใหม่นั้นลดลงทำให้ SE cell ลดการสูญเสียการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นสั้นอีกด้วย

2.3.6 ช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime)

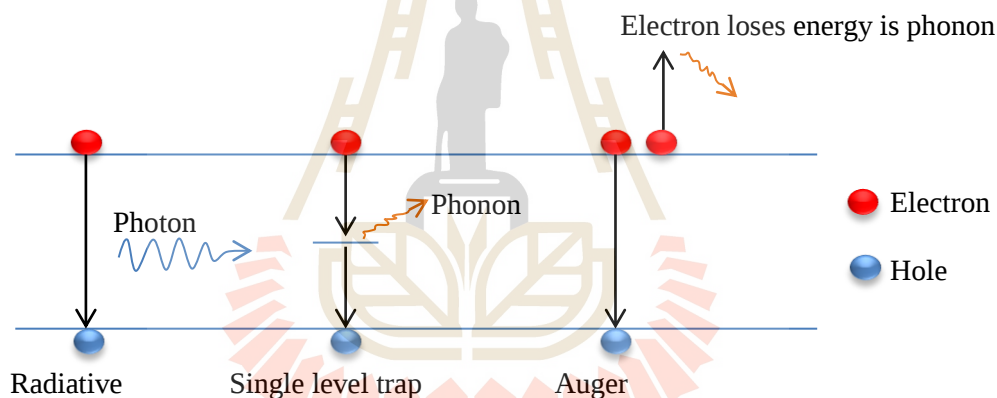
เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ยังมีตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน คือระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อย (Diffusion length) ของ

อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งใช้เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญตัวหนึ่งในสมการกระแสนย้อนกลับอิ่มตัว (I_0) ซึ่งเป็นตัวแปรในอุปกรณ์รอยต่อ p/n-Si ดังสมการที่ (2.2) ระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อย ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad (2.8)$$

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.9)$$

จากความสัมพันธ์พบว่าระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยแปรผันตรงกับช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย และเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งการรวมตัวใหม่ของพาหะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อแสงตกกระทบบที่เซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่กลไกของการรวมตัวใหม่ของพาหะแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 ลักษณะของการเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะ

1. การรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสง (Radiative recombination) เกิดจากการตกกลับของอิเล็กตรอนชั้น E_c มารวมตัวกับโฮลที่ชั้น E_v คายพลังงานเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุ
2. การรวมตัวใหม่ของพาหะแบบแถบดักจับตรงกลาง (Trap center recombination) มีอีกหนึ่งชื่อเรียกว่า การรวมตัวใหม่ของพาหะแบบ SRH (Shockley-Read-Hall recombination) เป็นหนึ่งในส่วนหลักที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นผลมาจากจุดบกพร่องในเนื้อผลึก จากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นถึงสถานะระดับพลังงานที่กับดักพาหะอยู่ระหว่างช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนตกกลับเข้าสู่บริเวณแถบดักจับตรงกลางอิเล็กตรอนจะคาย

พลังงานค่าต่ำหรือพลังงานโฟนอน (Phonon) ที่อยู่ในรูปของความร้อนออกมาจากนั้นพาหะอิเล็กตรอนที่บริเวณดักจับจะคายพลังงานโฟนอนกลับสู่ชั้นวาเลนซ์ และเกิดการรวมตัวใหม่กับโฮลเกิดขึ้น

3. การรวมตัวใหม่ของพาหะแบบเออเจ (Auger recombination) เป็นหนึ่งในส่วนหลักที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดขึ้นได้สูงมากในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสารเจือปนเข้มข้นสูง ซึ่งการเกิดการรวมตัวใหม่ในลักษณะนี้เกิดจากพาหะได้รับการถ่ายโอนพลังงานที่ $h\nu$ มากกว่า E_g เมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานที่มีพลังงานส่วนเกินไปถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนตัวข้าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะไปที่สถานะสูงกว่า และคายพลังงานอีกครั้งที่ระดับ E_c ทำให้เกิดพลังงานโฟนอนขึ้น ซึ่งจะเกิดจากการมีอะตอมสารเจือปนในชั้นวัสดุสูง (Heavily doped Si)

จากการรวมตัวใหม่ของพาหะทั้ง 3 แบบ พบว่าแบบ SHR และ Auger เป็นส่วนหลักที่พบในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าช่วงชีวิตพาหะของวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย โดยพาหะข้างน้อยนี้ผลิตขึ้นภายใต้แสงตกกระทบ และข้ามรอยต่อเพื่อรวบรวมไปยังขั้วไฟฟ้า ค่าช่วงชีวิตของพาหะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งปัจจัยที่สำคัญขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นในปริมาณมากจากแสงตกกระทบนี้ ได้ข้ามรอยต่อไปรวมกับพาหะในชั้น n-Si หรือชั้น p-Si เราจึงเรียกพาหะส่วนเกินข้างน้อย ซึ่งสัมพันธ์กับ τ และ R แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (2.10)$$

โดยที่ τ คือค่าช่วงชีวิตของพาหะ

Δn คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินข้างน้อย (Excess minority carriers)

R คืออัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ

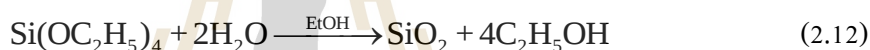
ผลรวมของอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะทั้ง 3 แบบ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{Radiative}}} + \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} \quad (2.11)$$

2.3.7 แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งสารเจือที่ใช้สำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si มีอยู่ 3 ชนิด คือสารเจือที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งแหล่งกำเนิดของสารเจือมักอยู่ในรูปของสารประกอบ อย่างเช่น กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งสารเจือที่มีสถานะเป็นของแข็ง โดยเตรียมได้จากการสังเคราะห์โซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ Sol-gel คือสังเคราะห์ได้ง่าย สามารถกำหนดความเข้มข้นของอะตอมสารเจือได้ และมีราคาถูก

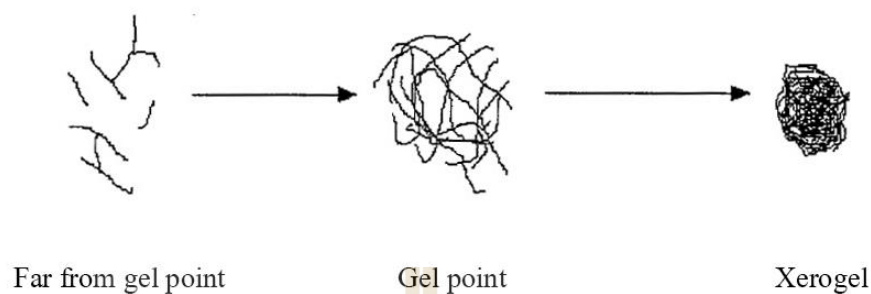
การสังเคราะห์ Sol-gel เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการแพร่เน้นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และ การควบแน่น (Condensation) ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์ Sol-gel ด้วยวิธี Hydrolysis ซึ่งวิธี Hydrolysis คือปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารโมเลกุลเล็ก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลาย Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) กับน้ำ DI เป็นสารตั้งต้น และใช้ C_2H_5OH (EtOH) เป็นตัวทำละลาย โดยมีสมการทางเคมีของการเกิด Sol-gel แบบไฮโดรไลซิสดังต่อไปนี้



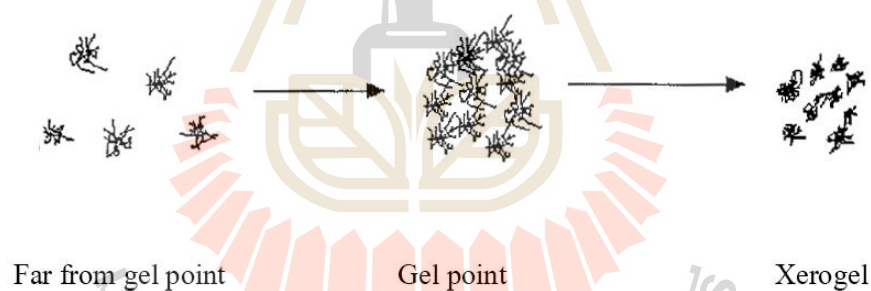
เนื่องจากกระบวนการเกิด Sol-gel หรือกระบวนการ Polymerization นั้นใช้เวลานานจึงได้เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ลงไปในการสังเคราะห์ เพื่อให้เกิดกระบวนการ Polymerization ได้เร็วขึ้น ซึ่งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเลือกเติมได้ 2 ชนิด คือตัวเร่งชนิดที่เป็นกรด (Acid-catalyzed) และเบส (Base-catalyzed) โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากรด และเบสนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17 (ก) แสดงการเปลี่ยนสภาพของกระบวนการเกิดเจลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด พบว่าจะทำให้เกิด Polymerization เป็นแบบสายยาว และ(ข) พบว่าจะทำให้เกิด Polymerization เป็นแบบสายสั้น ทั้งนี้การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้

Acid-Catalyzed Hydrolysis



Base-Catalyzed Hydrolysis



รูปที่ 2.17 (ก) รูปแบบการเกิดเป็นเจลจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และ(ข) รูปแบบการเกิดเป็นเจลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส (M.J. Chem. ED 1994, 71(7), 599.)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบการเติมกรด เนื่องจากผู้ศึกษาต้องการลักษณะการเกิด Polymerization เป็นแบบสายยาว เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี และสารละลายกรดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือ H_3PO_4 (Phosphoric acid) เนื่องจากต้องการอะตอมสารเจือหมู่ 5 คือ ฟอสฟอรัส (P) เพื่อแพร่ลงในแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si เกิดเป็นรอยต่อ p/n-Si

บทที่ 3

ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ

3.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter solar cell, SE cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น n-Si สองบริเวณ ซึ่งประกอบไปด้วยบริเวณชั้น n-Si ที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูงให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำ (n^{++} -Si) และบริเวณชั้น n-Si ที่มีความหนาแน่นของสารเจือต่ำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง งานวิจัยที่ผ่านมาสร้างชั้น n-Si ให้มีค่าความต้านทานได้สองบริเวณนั้นได้อาศัยการแพร่ด้วยความร้อน 2 ขั้นตอน ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการสร้างชั้น n-Si สองบริเวณด้วยการแพร่ความร้อนเพียงขั้นตอนเดียวและใช้วิธีต้นทุนที่ต่ำประกอบด้วย การพิมพ์ลายหมึกสารเจือและการประทับลาย ในบทที่ 3 จะแสดงรายละเอียดในการสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนเพียงขั้นตอนเดียว และการสร้าง SE cell ด้วยวิธีการสกัดชั้น n-Si ด้วยสารเคมี (Etching Back)

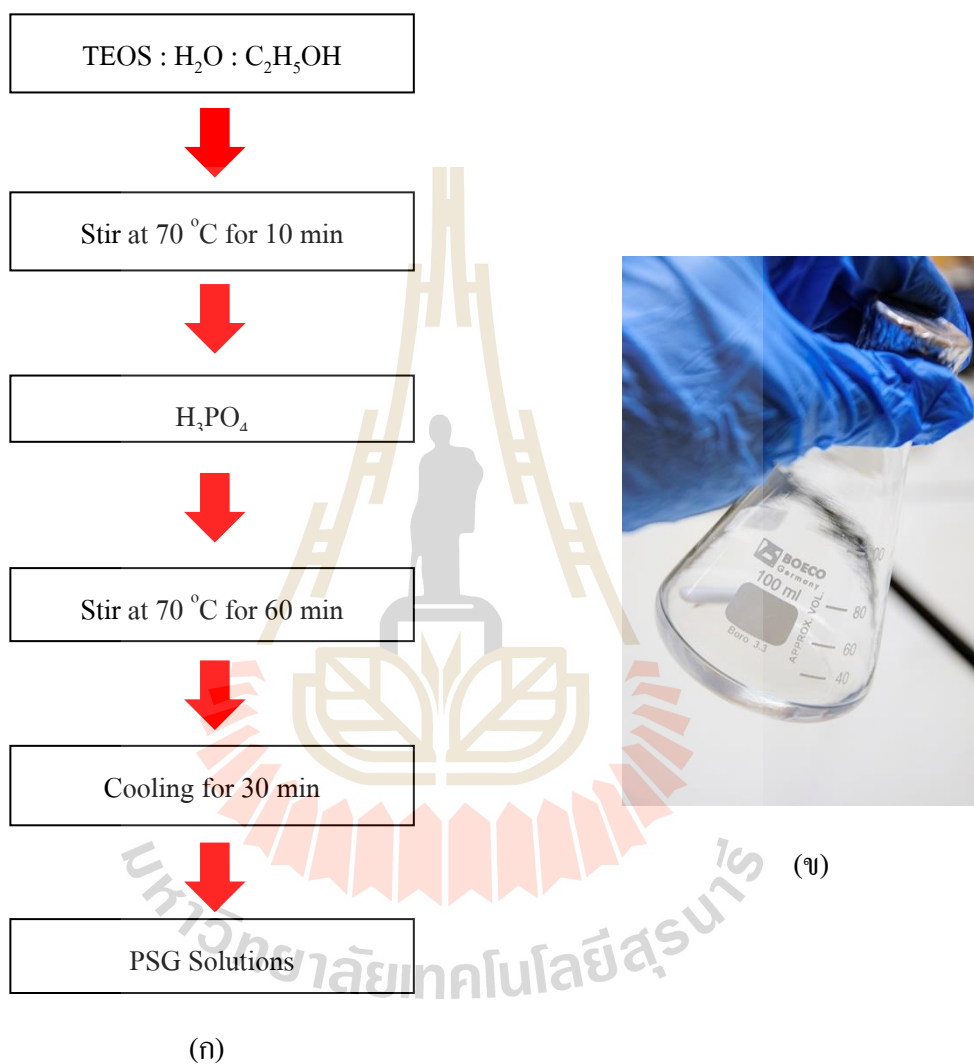
3.2 การสร้างชั้นฟิล์ม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสให้กับ SE cell

3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือในชั้น n-Si

การเตรียมสารตั้งต้นในรูปของสารละลายเพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสประกอบไปด้วย TEOS : H₂O : C₂H₅OH มีอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 5 ml : 10 ml : 1.5 ml และ H₃PO₄ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อผสมสารละลาย TEOS : H₂O : C₂H₅OH โดยกวนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที หลังจากนั้นเติม H₃PO₄ ลงไปอย่างช้าๆ และกวนต่อที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 60 นาที และปล่อยให้เย็นลง 30 นาที จะได้สารละลาย PSG (Phosphor silicate glass) สำหรับสร้างชั้นฟิล์ม PSG ต่อไป ดังตารางที่ 3.1 แสดงค่าปริมาณการเติม TEOS H₂O C₂H₅OH และ H₃PO₄ และค่าเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัส

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงขั้นตอนการเตรียม PSG ink ส่วนสำคัญของการเตรียมสารละลายนั้นจำเป็นต้องทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดอย่างช้า ๆ และหยดสารละลาย H₃PO₄ อย่างช้า ๆ ทำให้สารละลายเป็นของเหลวใสแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้สารละลายเปลี่ยน

สภาพเป็นเจลที่มีคุณภาพดี และเป็นฟิล์มที่ดีในที่สุด ถ้าหากเติมสารละลาย H_3PO_4 เร็วเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้สารละลายข้นและจับตัวกันเป็นก้อนวุ้น เมื่อนำไปผลิตเป็นฟิล์มจะได้รับความหนาที่ไม่สม่ำเสมอและเกิดผิวแตกเสียหาย



รูปที่ 3.1 (ก) ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG และ (ข) ลักษณะของสารละลาย PSG

ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในแต่ละเงื่อนไขสำหรับการเตรียมสารละลาย PSG ink

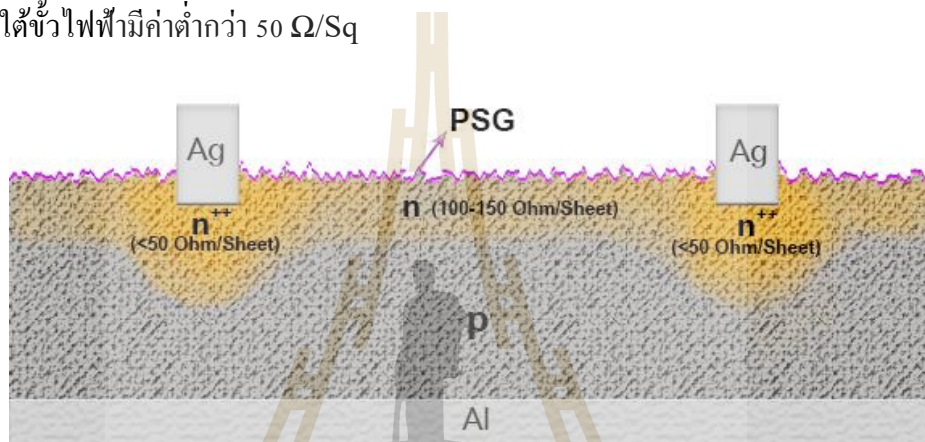
เงื่อนไข สารละลาย $\text{TEOS} : \text{H}_3\text{PO}_4$	TEOS (ml)	H_2O (ml)	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (ml)	%P (%at.)	H_3PO_4 (ml)
9.0 : 1	5	10	1.5	0.30	0.56
8.5 : 1				0.31	0.59
8.0 : 1				0.32	0.63
7.5 : 1				0.36	0.67
7.3 : 1				0.37	0.68
7.0 : 1				0.38	0.71
6.5 : 1				0.41	0.77
6.0 : 1				0.45	0.83
5.0 : 1				0.53	1.00
4.0 : 1				0.66	1.25
3.0 : 1				0.86	1.67

3.2.2 เทคนิคต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ SE (Selective Emitter)

การสร้างชั้น $\text{n}^{++}\text{-Si}$ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (ρ_{Sheet}) ต่ำกว่า $50 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ ให้กับเซลล์ทำให้สัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานที่แสงสีน้ำเงินมีค่าต่ำ เนื่องจากเกิดความเร็วในการรวมตัวของพาหะสูง ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.3 แต่จะส่งผลดีในเรื่องของโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าที่ดี และการสร้างชั้น n-Si ที่มีค่า ρ_{Sheet} สูงอยู่ในช่วง $50 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ ถึง $150 \text{ } \Omega/\text{Sq}$ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินได้ดี แต่ถ้า ρ_{Sheet} สูงเกินไปจะมีโอกาสเกิด Dead layer ได้ และยังส่งผลถึงโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้น ๆ การสร้างของชั้น n-Si ที่มีความแตกต่างกัน 2 บริเวณ จึงสามารถลดปัญหาในส่วนของการดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินและโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ดีได้ และวิธีการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si จากเทคนิคของ SSOD (Spin and Screen on Doped) จึงสามารถทำให้เกิดชั้น n-Si และชั้น $\text{n}^{++}\text{-Si}$

ซึ่งโดยธรรมชาติวัสดุซิลิคอนจะเกิดการสูญเสียการดูดกลืนคลื่นย่านต่าง ๆ ใน 2 ส่วนคือสูญเสียเชิงความร้อน (Thermalization losses) ถึง 35% และสูญเสียแบบทะลุผ่าน (Transmission losses) ไปอีก 20% เนื่องจากพลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่า E_G (Si) ดังรูปที่ 2.5 ใน บทที่ 2 และด้วยเหตุนี้การสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณจะช่วยเพิ่มการดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินได้ และยังส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

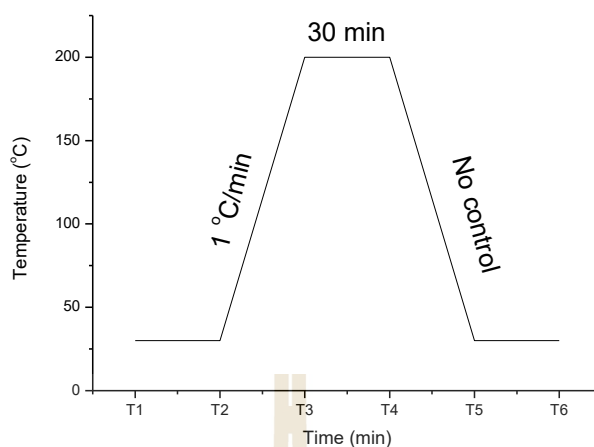
จากรูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้าง SE cell จากหลักการแล้วค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si หรือบริเวณรับแสงนั้นมีค่าอยู่ในช่วง $100 \Omega/Sq$ ถึง $150 \Omega/Sq$ และค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n^{++} -Si หรือ บริเวณได้ขั้วไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า $50 \Omega/Sq$



รูปที่ 3.2 โครงสร้าง SE cell

3.2.2.1 การผลิตฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

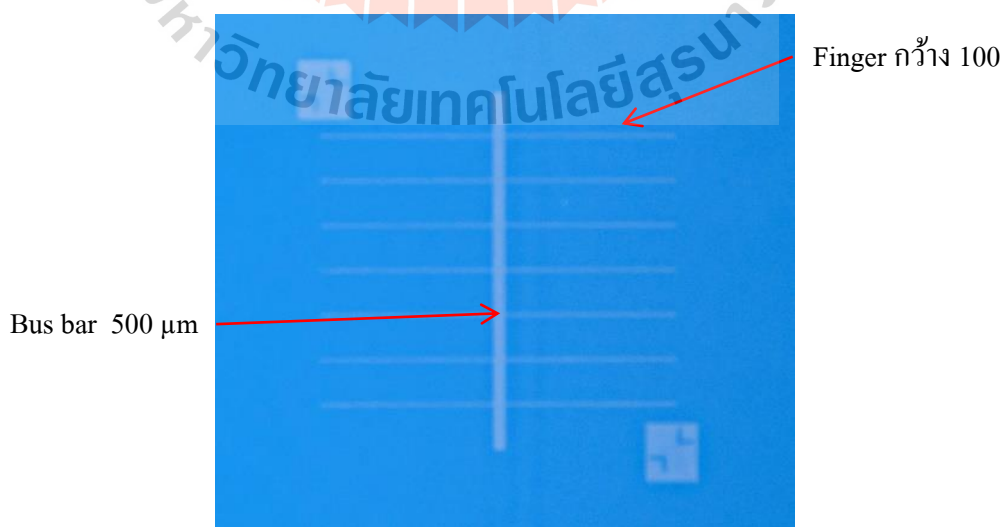
เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงสามารถเคลือบฟิล์มได้อย่างสม่ำเสมอและทำให้ฟิล์มมีความบางในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หลังจากเตรียมสารละลายสำหรับสร้างชั้นฟิล์ม PSG เพื่อเป็นสารเจือให้กับแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si แล้ว จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 และ RCA2 มีขั้นตอนการทำความสะอาดตามภาคผนวก ง หลังจากทำความสะอาดแผ่นฐานแล้ว นำแผ่นฐานไปเคลือบด้วยสารละลาย PSG ที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำ (lightly doped PSG) เพื่อสร้างชั้นฟิล์ม PSG บริเวณที่ 1 ด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที นาน 10 วินาที และขั้นตอนที่สองใช้ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที เพื่อเป็นชั้น n-Si ที่สารเจือเข้มข้นต่ำในบริเวณรับแสง (Lightly doped PSG) หลังจากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนที่ถูกเคลือบด้วยสารละลาย PSG ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำแล้วไปอบที่อุณหภูมิ $200^{\circ}C$ นาน 30 นาที โดยที่อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $1^{\circ}C/min$ แสดงกราฟดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟอัตราการขึ้น และลงของอุณหภูมิในการอบฟิล์ม PSG

3.2.2.2 การสร้างลวดลายฟิล์ม PSG ด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing)

เมื่อสร้างชั้นฟิล์ม PSG เข้มข้นต่ำสำหรับบริเวณชั้น n-Si ขั้นตอนการสร้างบริเวณ PSG เข้มข้นสูงมีลักษณะเป็นลวดลายกริด สามารถพิมพ์ลวดลาย (Screen printing) ด้วยสารละลาย PSG เข้มข้นสูงในเจือปน 3:1 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.86 %at. รูปแบบของฟิล์ม PSG เข้มข้นสูงนั้นอยู่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (n^+ -Si) หลังจากได้ลวดลาย PSG แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 30 นาที อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 1 °C/min อีกครั้ง จะได้ชั้นฟิล์ม PSG เข้มข้นสูง (Heavily doped PSG) สำหรับการสร้างบริเวณ n^+ -Si ใต้ขั้วไฟฟ้า ภาพถ่ายแสดงลวดลายที่ใช้พิมพ์สารละลาย PSG เข้มข้นสูง ดังรูปที่ 3.4

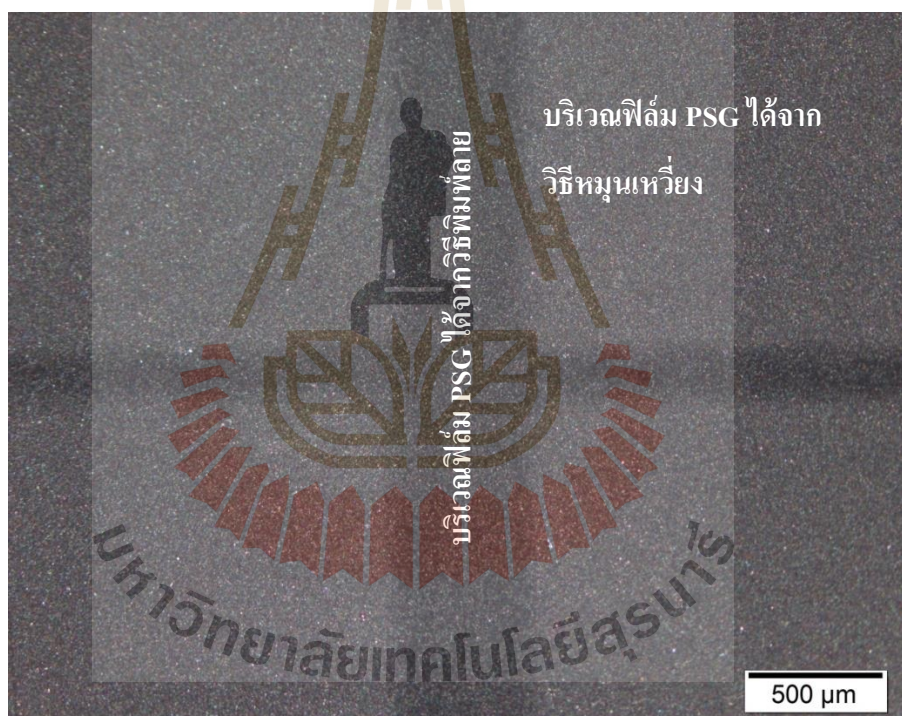


รูปที่ 3.4 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย PSG เข้มข้นสูง

รูปที่ 3.4 คือภาพถ่ายลวดลายไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย และได้เลือกไหมเบอร์ 100 (100 mesh) หมายถึงขนาดของช่องที่ยอมให้สารละลายไหลผ่านได้ มีขนาดสี่เหลี่ยมเท่ากับ $149\ \mu\text{m} \times 149\ \mu\text{m}$ และจากรูปที่ 3.3 แสดงขนาดความกว้างของช่องเปิดพิมพ์ลายของ Bus bar และ Finger ที่ออกแบบไว้โดยมีค่าเท่ากับ $500\ \mu\text{m}$ และ $100\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ

3.3 การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion)

เมื่อทำการสร้างชั้นฟิล์ม 2 บริเวณ สำหรับการแพร่สารเจือในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งลักษณะของฟิล์มที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.5 เป็นภาพถ่ายฟิล์มสารเจือ PSG 2 บริเวณ เพื่อใช้เป็นสารเจือในการสู่กระบวนการแพร่ เมื่อได้ชั้นฟิล์มสารเจือ PSG แล้ว จากนั้นให้นำชั้นฟิล์มที่ไปเข้าสู่กระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูง เพื่อให้เกิดชั้น n-Si บนแผ่นซิลิคอนชนิดพี หรือที่เรียกว่าเกิดรอยต่อ p/n-Si



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายฟิล์มสารเจือ PSG 2 บริเวณ

3.3.1 เงื่อนไขการแพร่สารเจือ PSG 2 บริเวณ

การแพร่สารเจือด้วยความร้อนในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่าในกลไกการแพร่สามารถควบคุม ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ อุณหภูมิการแพร่ และเวลาในการแพร่ได้ ตามทฤษฎีของ Fick โดยงานวิจัยนี้พิจารณาการแพร่จากแหล่งสารเจือแบบไม่จำกัด (Unlimited Source) และมีสมการการแพร่ดังสมการที่ (3.1)

$$N(x,t) = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.1)$$

โดยที่ $N(x,t)$ คือความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ t ใด ๆ

x คือระยะความลึกของการแพร่ (μm)

t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่ (s)

N_0 คือความหนาแน่นของสารเจือที่ผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ($\text{atom} \cdot \text{cm}^{-3}$)

D คืออุณหภูมิการแพร่จำเพาะ ($D = D_0 \exp(-\frac{E_d}{kt})$)

D_0 คือค่าคงที่ของการแพร่ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

E_d คือพลังงาน Activation ของการแพร่สารเจือ (eV)

จำนวนอะตอมสารเจือต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย ของสารกึ่งตัวนำเท่ากับ $Q(t)$ ซึ่งแสดงดังสมการ (3.3) และเพื่อสะดวกต่อการใช้งานสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (3.4)

$$Q(t) = \int N(x,t) dx \quad (3.2)$$

$$Q(t) = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (3.3)$$

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = \operatorname{erfc} \cdot z \quad (3.4)$$

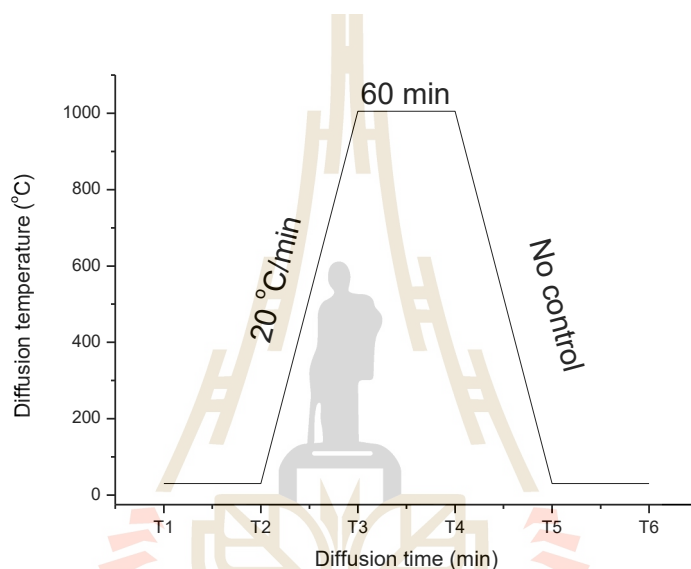
โดยที่ $z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

จากการคำนวณเพื่อหาค่าความลึก (x_j) ของการแพร่ตามสมการของ Fick จะได้ x_j จากแหล่งสารเจือเงื่อนไข 5.0 : 1 เท่ากับ $0.58 \mu\text{m}$ แสดงการคำนวณดังภาคผนวก ค

ดังนั้นจึงทำให้ผู้ศึกษาสามารถประมาณค่าความหนาของชั้น n-Si และสามารถสร้างชั้น n-Si ที่มีค่า ρ_{Sheet} ที่มีค่าแตกต่างกันและเหมาะสมสำหรับการสร้าง SE cell ได้ในการศึกษานี้ได้กำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลาย ค่าความร้อนในการแพร่ และเวลาในการแพร่ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ

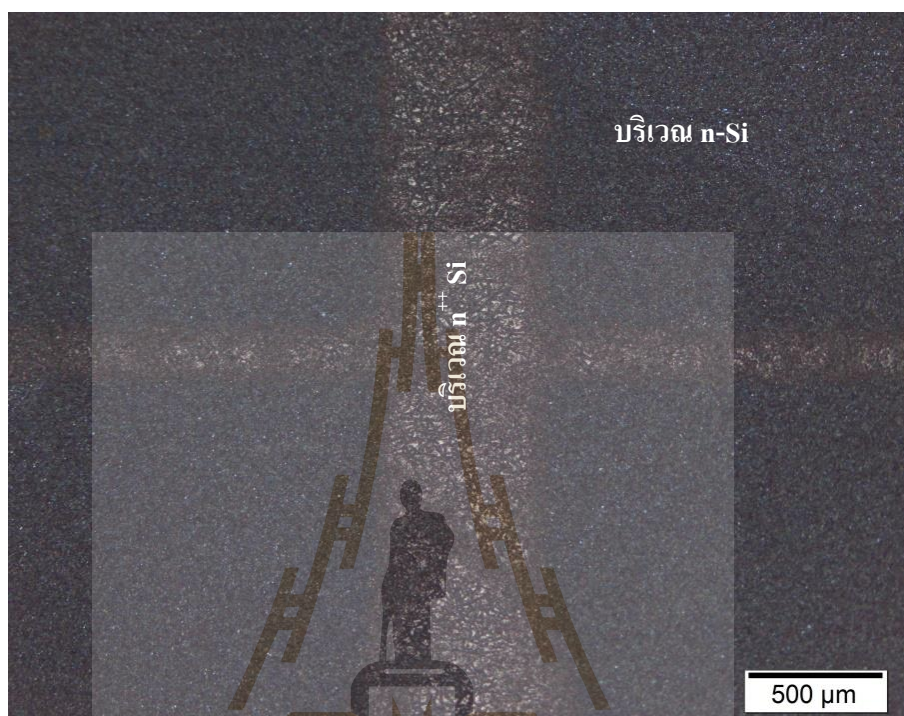
Diffusion Temperature (°C)	Diffusion Time (min)
900	30
950	60
1000	90



รูปที่ 3.6 กราฟอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการแพร่

จากตารางที่ 3.2 ผู้ศึกษาได้กำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาในการแพร่สารเจือ เพื่อได้ชั้น n-Si ที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่าง ๆ จากนั้นนำชิ้นงาน ในเงื่อนไขสารละลาย TEOS : H_3PO_4 ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 มาเข้าเตาอุณหภูมิสูง และตั้งค่าการทำงานของเตา โดยให้อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ภายใต้ก๊าซ N_2 99.99% มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 100 sccm จากนั้นให้เตาเริ่มทำงานแสดงกราฟอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ดังรูปที่ 3.6 เมื่อทำการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในเงื่อนไขการแพร่ที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 60 นาที จะเกิดขึ้นฟิล์ม PSG ที่ผิวของแผ่นเพิ่มขึ้น การกำจัดชั้น PSG หลังการแพร่ทำได้โดยแช่ในสารละลาย HF5% นาน 3 นาที ล้างด้วยน้ำ DI ขณะเดียวกันชั้นฟิล์ม BSG (Borosilicate glass) ที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นกำจัดด้วยสารละลาย BHF โดยนำไปแช่ในสารละลายนาน 1 นาที แล้วไหลผ่านน้ำ DI 1 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2 บริสุทธิ์ 99.9%

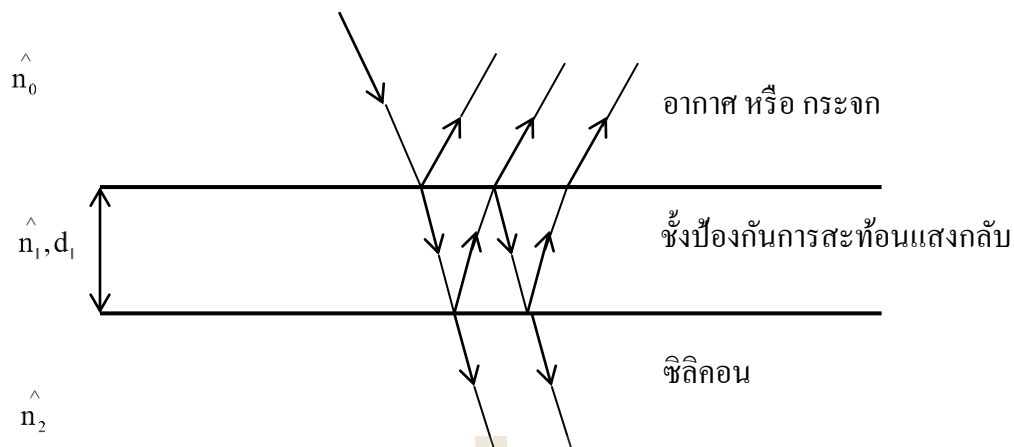
หลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C นาน 60 นาที ลักษณะผิวด้านบนของแผ่นที่ผ่านการแพร่สารเจือแล้ว แสดงพื้นที่ของ n^{++} -Si ในบริเวณสีอ่อนและพื้นที่ของ n -Si ในบริเวณสีเข้มดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายผิวด้านบนของแผ่นฐานซิลิคอนหลังจากผ่านขั้นตอนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน

3.3.2 ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับด้วยฟิล์ม PSG

เซลล์แสงอาทิตย์วัสดุซิลิคอนแบบผิวเรียบ (Polished Si) มีพื้นผิวที่สะท้อนแสงสูงกว่า 30% ซึ่งการสะท้อนแสงจะลดลงโดยการสร้างผิวขรุขระ (Textured Si Surface) ให้กับพื้นผิว และการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-reflection coatings, ARC) บนพื้นผิวของเซลล์ ซึ่งเป็นวัสดุฉนวนบาง ๆ ที่มีความหนาที่ออกแบบไว้เป็นพิเศษเพื่อลดผลกระทบการสะท้อนกลับหมดตามกฎของ Snell law ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงแสดงสมการที่ (3.5) และรูปที่ 3.8 แสดงผลกระทบของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับบนซิลิคอน



รูปที่ 3.8 ผลกระทบการสะท้อนแสงที่เกิดจากชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta} \quad (3.5)$$

โดยที่ r_1 และ r_2 เท่ากับ

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (3.6)$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (3.7)$$

โดยที่ R คือค่าการสะท้อนแสงกลับ

n_0 คือค่าดัชนีหักเหของแสงของอากาศหรือกระจก

n_1 คือค่าดัชนีหักเหของแสงของชั้นป้องกันการสะท้อนแสง

n_2 คือค่าดัชนีหักเหของแสงของซิลิคอน

d_1 คือความหนาของชั้นฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสงกลับ

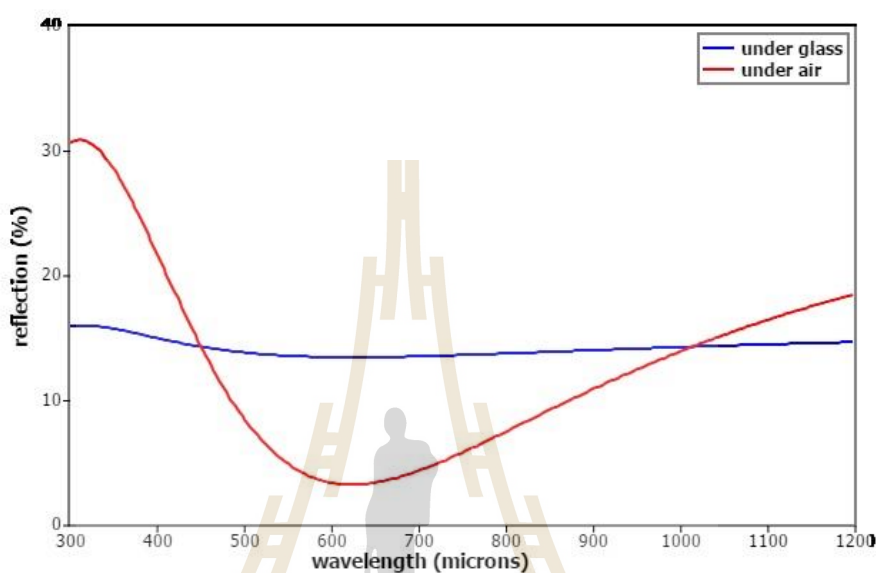
λ คือความยาวคลื่น

θ คือมุมระหว่าง n_0 และ n_1

ในการเคลือบชั้น ARC ช่วยลดการสะท้อนแสงกลับบริเวณพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมใช้ซิลิคอนไนไตร (SiN_x) เป็นชั้น ARC ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ PSG (Phosphor silicate glass) ที่ได้จากการแพร่สารเจือเป็นชั้น ARC

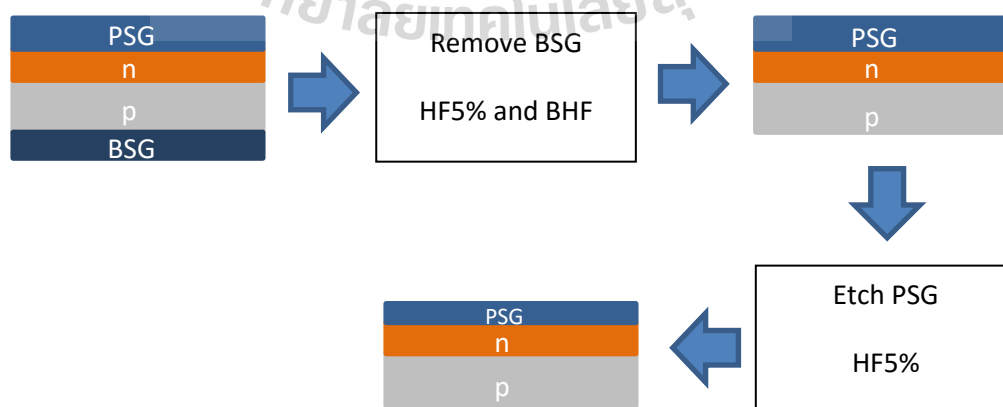
เนื่องจากชั้นฟิล์ม PSG ที่ได้นั้นมีความหนาที่ยังไม่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสกัดชั้นฟิล์ม PSG ให้มีความหนาอยู่ในช่วง 100 nm ถึง 110 nm เนื่องจากชั้นฟิล์ม PSG

มีค่าดัชนีหักเหของแสงอยู่ในช่วง 1.52 ถึง 1.56 จึงทำให้ต้องกำหนดความหนาอยู่ในช่วงดังกล่าว แสดงผลการจำลองการสะท้อนกลับของแสง (Reflection, %R) ดังรูปที่ 3.9 พบว่าแสงความยาวคลื่นช่วง 550 nm ถึง 750 nm เป็นช่วงที่ให้พลังงานสูงและให้การสะท้อนแสงกลับน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้แสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์มีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 กราฟการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสะท้อนแสงกลับของฟิล์ม PSG

รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการสร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับจากชั้น PSG film ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังสกัดออกด้วยสารละลาย HF5% นาน 3 นาที และ BHF นาน 1 นาที สกัดชั้นฟิล์ม PSG ในสารละลาย HF5% นาน 30 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 แผนภาพการกำจัดชั้น BSG film และการสกัดชั้น PSG film ที่ผิวแผ่นฐาน p/n-Si

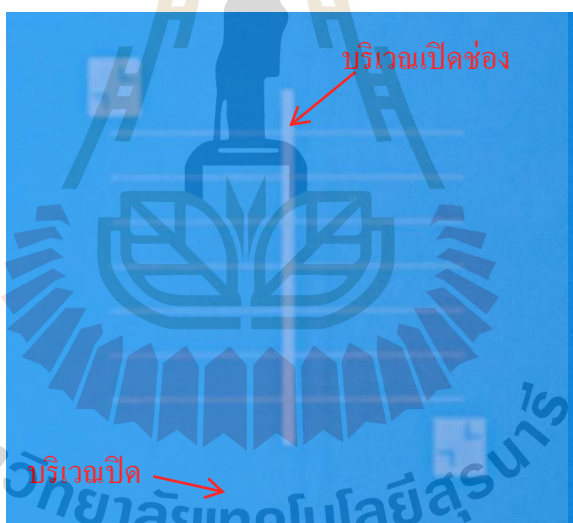
3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบขั้วไฟฟ้าด้านบนเกี่ยวข้องกับการลดค่าความต้านทานต่อขั้วไฟฟ้ากริด (Finger contact) และขั้วไฟฟ้าบัสบาร์ (Bus bar contact) ด้านบน เพื่อลดการสูญเสียโดยรวมของขั้วไฟฟ้าด้านบน รวมไปถึงการสูญเสียจากค่าความต้านทานในชั้นรับแสง และการสูญเสียที่เกิดจากการบดบังแสงของขั้วไฟฟ้า ซึ่งความสำคัญของการออกแบบได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.4

หลังจากสร้างชั้น PSG film เพื่อเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นให้นำชิ้นงานมาสร้างขั้วไฟฟ้า โดยที่การสร้างขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการพิมพ์ลาย มีขั้นตอนต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบน

นำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 จากนั้นพิมพ์ลายด้วย Ag paste ด้านบนชั้นรับแสงบริเวณ n^+ Si ด้วยลวดลายดังรูปที่ 3.11 จากนั้นไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาที จากนั้นนำไปสร้างขั้วไฟฟ้าด้านหลังในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.11 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านบน

2. ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าด้านหลัง

หลังจากอบขั้วไฟฟ้าด้านบนเป็นที่เรียบร้อยแล้วให้นำชิ้นงานมาพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านหลังต่อ โดยใช้ Al paste ในการพิมพ์ลาย และแบบที่ใช้พิมพ์ลายดังในรูปที่ 3.12 หลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาที



รูปที่ 3.12 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายฉลุไฟฟ้าด้านหลัง

หลังจากการพิมพ์ลายฉลุไฟฟ้าด้านบนและด้านหลังแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ Co-firing contact จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด คือวิธีการนำฉลุไฟฟ้าด้านบนและด้านหลังผ่านความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing contact) พร้อมกัน โดยความร้อนที่ใช้กับฉลุไฟฟ้าด้านหลังเท่ากับ 850°C เป็นเวลา 6 วินาที และความร้อนที่ใช้กับฉลุไฟฟ้าด้านบนเท่ากับ 930°C เป็นเวลา 6 นาที

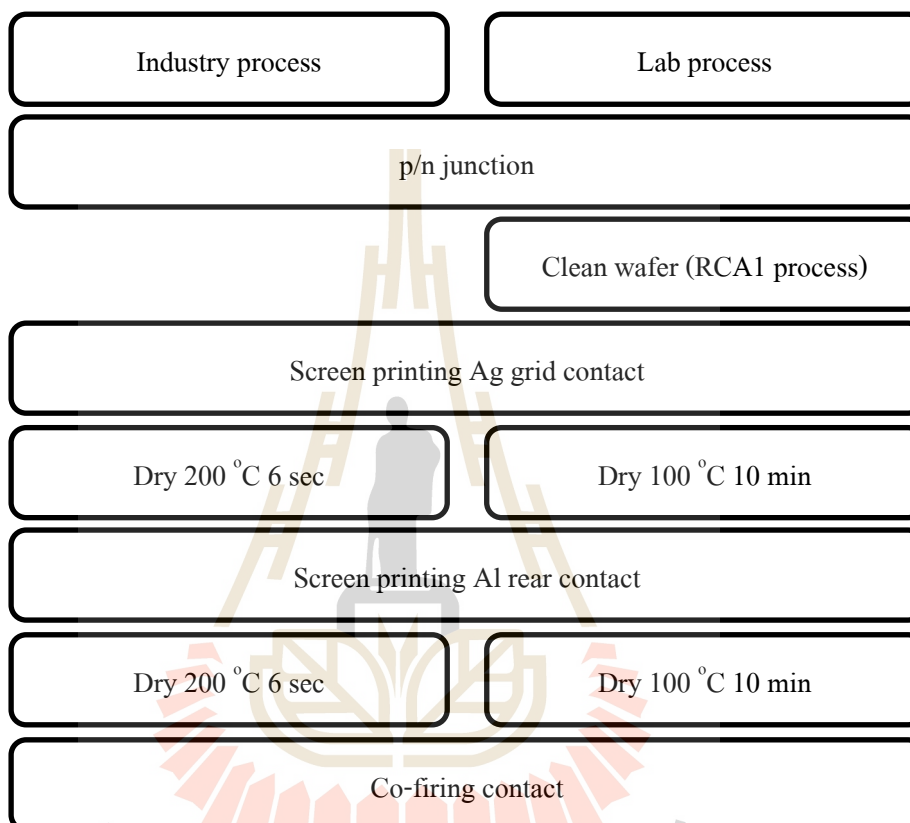


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายฉลุไฟฟ้าหลังจากที่ผ่านกระบวนการ Fast firing ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ภาพถ่ายฉลุไฟฟ้าด้านบน และ (ข) ภาพถ่ายฉลุไฟฟ้าด้านหลัง

รูปที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการ Fast firing ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ภาพถ่าย (ก) คือภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าด้านบนหรือด้านรับแสง ขั้วไฟฟ้าด้านบนนั้นประกอบด้วย 1 bar และ 7 fingers และมีขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบของการบดบังแสงที่จะได้รับ และภาพถ่าย (ข) คือภาพถ่ายขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ที่บริเวณแผ่นเพื่อรวบรวมพาหะโฮลด้าน p-Si



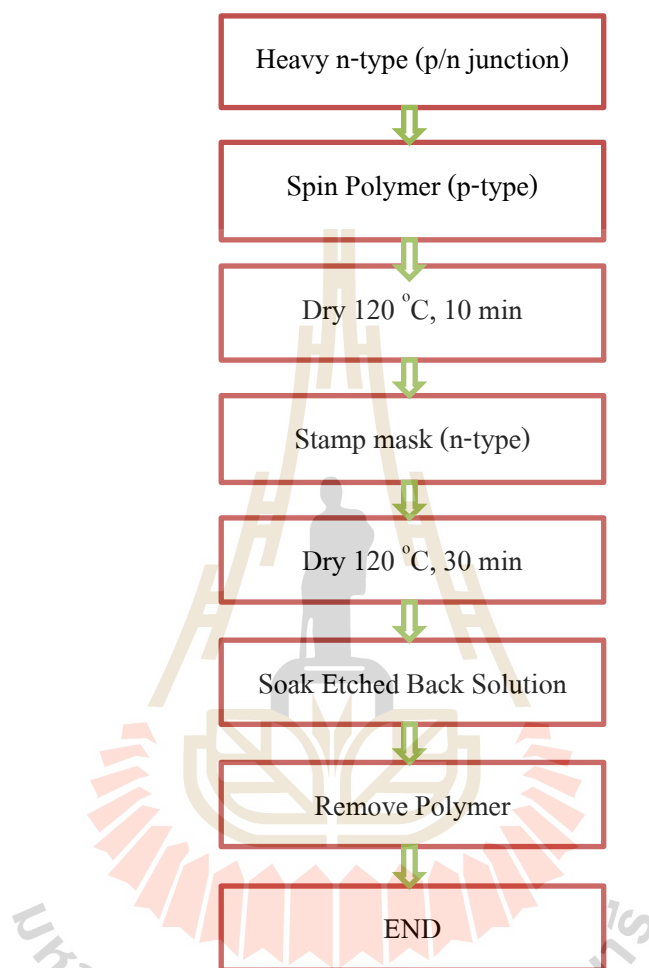
รูปที่ 3.14 แผ่นภาพขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าให้เซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบระหว่างการสร้างในอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าในอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 การสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย

การสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณด้วยวิธี Etching back เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการสร้าง SE cell ซึ่งจำเป็นต้องใช้หน้ากากป้องกันสารเคมีสกัดผิว (Acid resist mask) ในงานวิจัยอื่นๆ ใช้กระบวนการสร้างลวดลายฟิล์มป้องกันกรดด้วยแสง (Photolithography process) ซึ่งเป็น

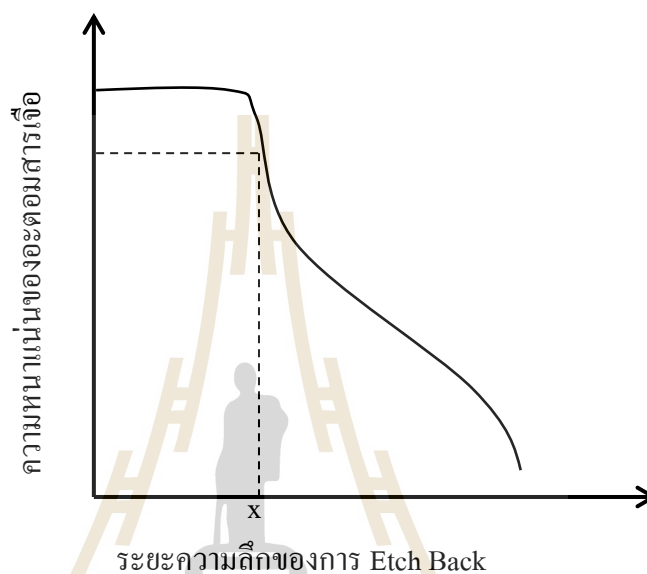
กระบวนการที่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้หาเทคนิควิธีใหม่ที่ใช้สร้าง Acid resist mask ที่ใช้ในกระบวนการ Etching back โดยใช้วิธีการประทับลาย (Stamp process) โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดในการสร้างดังนี้



รูปที่ 3.15 แผนภาพกระบวนการสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณด้วยวิธีการ Etching back

รูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนและกระบวนการของ Etching back ซึ่งการสร้าง Acid resist mask เพื่อป้องกันการกัดของสารเคมีนั้นในวิทยานิพนธ์ใช้เทคนิคการประทับลาย (Stamp) และการประทับลวดลาย Acid resist mask ซึ่งสารไวแสง PFI-34 เป็นโพลิเมอร์นำมาใช้เพื่อป้องกันการกัดจากเคมี ในขั้นแรกเป็นการสร้างรอยต่อ p/n-Si ของแผ่น Poly-Si มาเคลือบสารไวแสงด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงด้านที่เป็น p-Si แล้วนำไปอบที่ 120 °C นาน 10 นาที ขั้นที่สองนำรอยต่อ p/n-Si ที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงด้าน p-Si แล้วมาประทับลวดลายด้วยสารไวแสงด้าน n-Si แล้วนำไปอบอีกครั้งที่ 120 °C นาน 30 นาที เมื่ออบสารไวแสงจนครบเวลาให้นำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการ

Etching back เพื่อเพิ่มค่า ρ_{Sheet} ที่ผิวโดยสกัดชั้น n-Si จากการจุ่มลงในสารละลาย HF : HNO₃ ที่อัตราส่วน 200 : 1 ตามเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นล้างสารไวแสงที่ติดอยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N₂ บริสุทธิ์ 99% สิ้นสุดกระบวนการของ Etching back



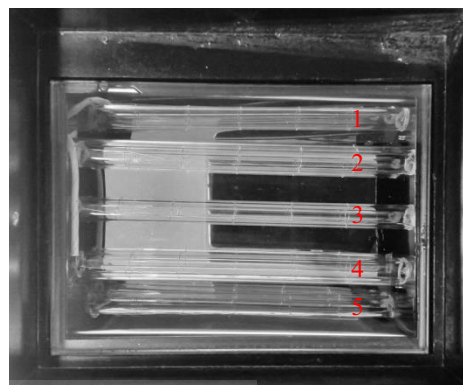
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอะตอมสารเจือกับระยะความลึกของการ Etching back

จากหลักการ Etching Back สามารถลดความเข้มข้นของสารเจือหรือทำให้ ρ_{Sheet} มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.16 ในวิทยานิพนธ์นี้สร้างโคมประทับลายด้วยเครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V แสดงภาพถ่ายเครื่อง Flash Stamp ดังรูปที่ 3.17 โดยขั้นตอนการสร้างเริ่มจากการออกแบบลวดลายทึบแสงป้องกันแสงแฟลชตามที่ต้องการ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบลวดลายแสดงดังรูปที่

3.18



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 ภาพถ่าย (ก) เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V และ (ข) หลอดแฟลชภายในเครื่อง

รูปที่ 3.17 (ก) แสดงภาพถ่ายเครื่องฉายแสงแฟลชหรือเรียกว่าเครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V มีแหล่งกำเนิดแสงแฟลชแสดงดังรูปที่ 3.17 (ข) ซึ่งประกอบด้วยหลอดแฟลชทั้งหมด 5 หลอด โดยเรียงจากหมายเลข 1 ถึง 5 ตามลำดับ และมีกระจกใสเป็นฐานสำหรับวางโฟมเพื่อฉายแสงแฟลช ซึ่งระบบการทำงานของเครื่อง Flash Stamp แสดงดังรูปที่ 3.18



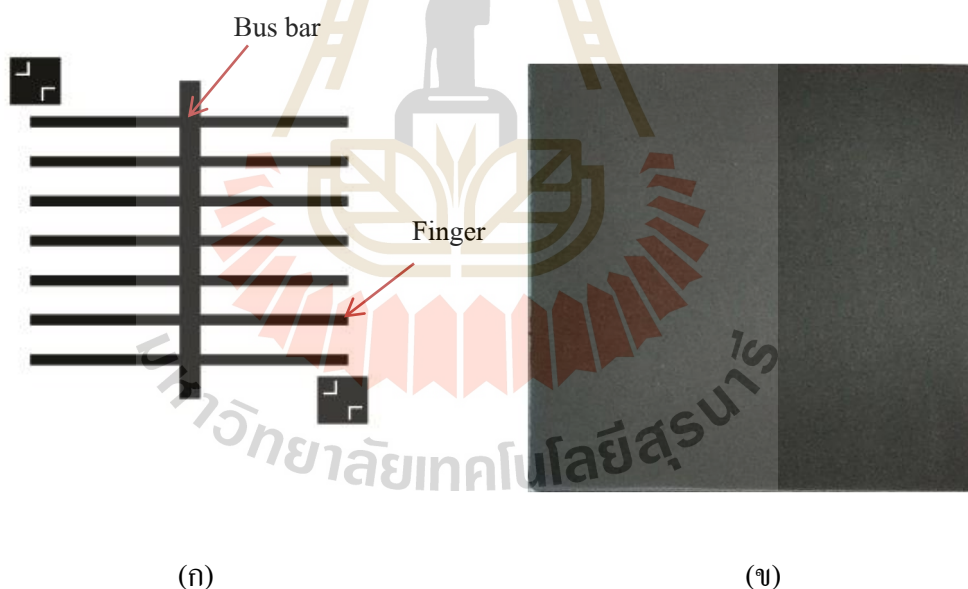
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง Flash Stamp

รูปที่ 3.18 แสดงระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง Flash Stamp โดยที่ระบบควบคุมมี 3 ส่วนคือ

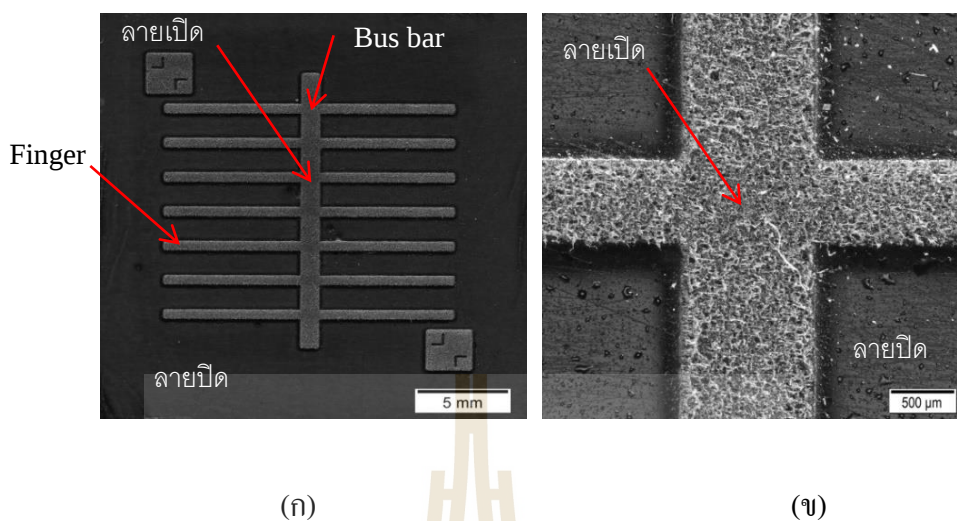
1. หมายเลข 1 คือจุดแสดงสถานะของเครื่อง Flash Stamp ขณะกำลังเปิดใช้งาน โดยจะแสดงเป็นสีแดง

2. หมายเลข 2 คือจุดปรับความเข้มแสงแฟลช โดยสามารถปรับระดับความเข้มแสงได้ 6 ระดับ จากการศึกษาพบว่าระดับความเข้มแสงปรับที่ประมาณ 3.5 จะได้ลวดลายที่คมและมีขนาดใกล้เคียงกับแบบที่ได้ออกแบบไว้
3. หมายเลข 3 คือจุดที่สั่งให้เครื่อง Flash Stamp ทำงานหรือฉายแสงแฟลชออกมา โดยการกดปุ่มหมายเลข 3 หนึ่งครั้ง

รูปที่ 3.19 (ก) แสดงแบบที่ใช้สร้างลวดลายของการ Stamp สารละลายป้องกันกรดโดยที่บริเวณ Bus bar มีขนาดกว้างเท่ากับ $1000\ \mu\text{m}$ และบริเวณ Finger มีขนาดกว้างเท่ากับ $500\ \mu\text{m}$ ซึ่งออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าแบบของขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อความสะดวกในการทำขั้วไฟฟ้า และลดปัญหาการพิมพ์ลวดลายของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ตรงกับบริเวณที่กำหนด และรูปที่ 3.19 (ข) แสดงลักษณะของโฟมที่ยังไม่ผ่านขั้นตอนการสร้างลวดลาย ซึ่งมีลักษณะเรียบเป็นรูปพรมขนาดเล็กมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น จากนั้นนำโฟมและแบบลวดลายที่เตรียมไว้เข้าเครื่อง Flash Stamp จะได้ลวดลายบนโฟม (Foam Stamp) แสดงดังรูปที่ 3.20

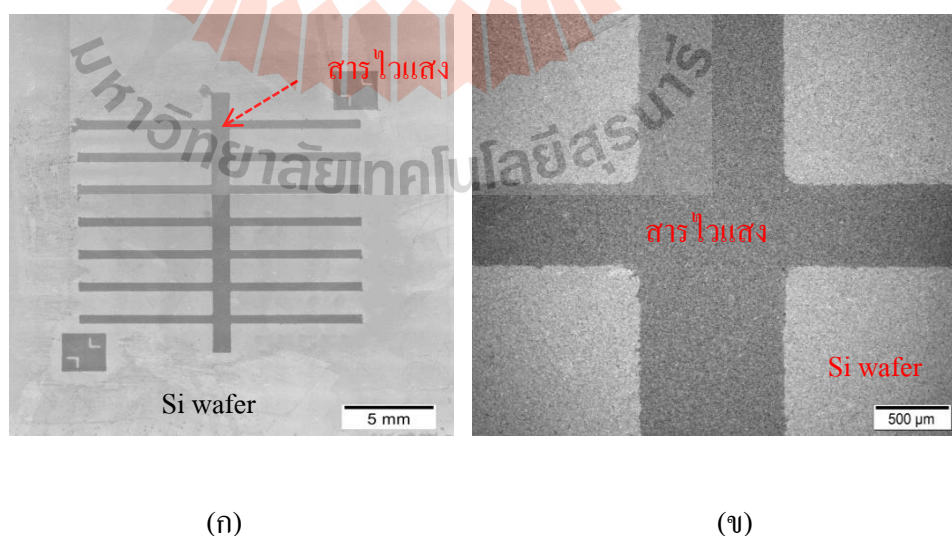


รูปที่ 3.19 (ก) ภาพถ่ายลวดลายป้องกันแสงแฟลช และ(ข) ภาพถ่ายผิวของโฟมที่จะนำมาสร้างลวดลายสำหรับการประทับลาย



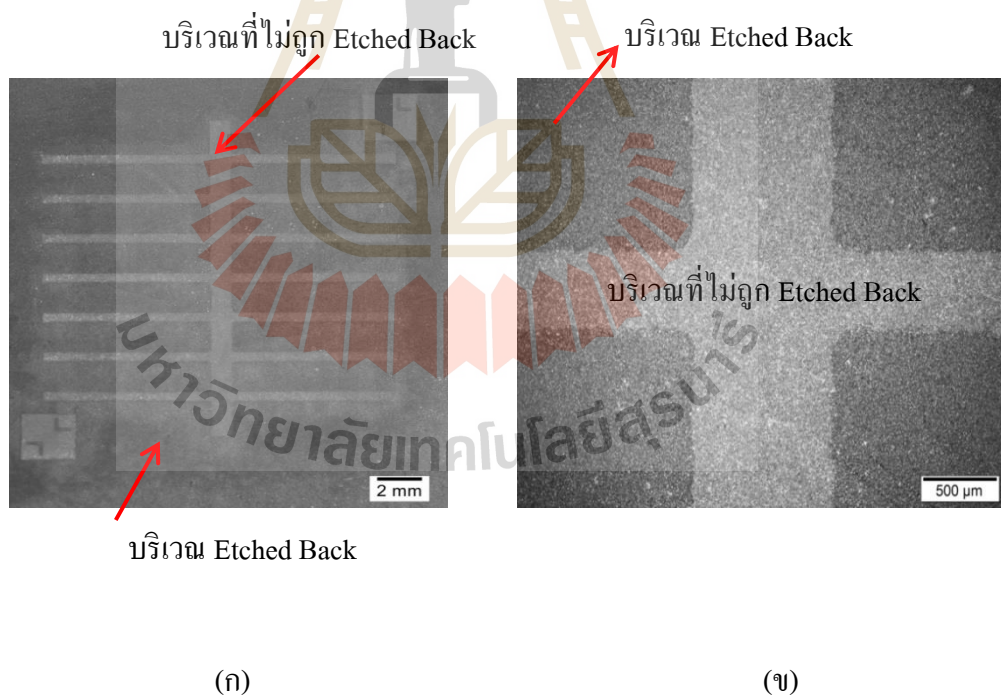
รูปที่ 3.20 (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Foam Stamp และ (ข) ลักษณะบริเวณลายเปิด และ บริเวณลายปิดของ Foam Stamp ที่เกิดขึ้น ที่กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 3.20 แสดงลวดลายที่เกิดขึ้นบนโฟม โดยการนำแบบรูปที่ 3.20 (ก) ไปป้องกันแสง แฟลชไม่ให้ฉายลงบริเวณที่ต้องการ ผลที่เกิดขึ้นพบว่าลวดลายเกิดขึ้นเหมือนกับแบบตามรูปที่ 3.20 (ก) และเมื่อวัดขนาดลวดลายของ Bus bar ที่เกิดขึ้นบน Foam Stamp พบว่ามีขนาดเท่ากับ $1080.56\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าแบบ 8.05 % และขนาดของ Finger ที่เกิดขึ้นบน Foam Stamp วัดได้ $542.38\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่าแบบ 8.41 %



รูปที่ 3.21 (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นหลังจากการประทับลายด้วยสารไวแสง และ(ข) ลักษณะของลวดลายที่ได้จากการประทับลายที่กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่ายลวดลายสารไวแสงพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นบน n-Si ซึ่งสารพอลิเมอร์นี้ทำหน้าที่เป็นหน้ากากป้องกันการกัดพื้นผิวซิลิคอนในกระบวนการสัปดาห์ Etching back หลังจากที่ถูกประทับลวดลายแล้ว ได้ทำการวัดขนาดของลวดลายที่เกิดขึ้นพบว่า Bus bar มีขนาด $999.12\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดลดลงจากแบบที่ออกแบบไว้ 0.09% และขนาดของ Finger วัดได้ $513.36\ \mu\text{m}$ พบว่ามีขนาดใหญ่กว่าแบบที่ออกแบบไว้ 2.67% จากผลแสดงให้เห็นว่าลวดลายสารไวแสงมีความคลาดเคลื่อนจากต้นแบบไม่เกิน 3% บ่งบอกให้เห็นว่าวิธีการประทับลายสามารถใช้ได้ในงานอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้เช่นกัน เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ถูกประทับลวดลายด้วยสารพอลิเมอร์ นำไปผ่านกระบวนการสัปดาห์ Etching back นาน 15 วินาที โดยที่สมบัติของสารไวแสงพอลิเมอร์พบว่าขนาดของลวดลายพอลิเมอร์บริเวณ Bus bar วัดได้ $928.74\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดลดลง 7.13% และลวดลายพอลิเมอร์ของบริเวณ Finger วัดได้ $398.82\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดลดลงจากแบบที่ออกแบบไว้ 20.24% และลักษณะของลวดลายที่ผ่านการ Etching back ในภาพถ่ายดังรูปที่ 3.22 จากขนาดที่ลดลงสามารถออกแบบลวดลายให้ใหญ่ขึ้นเพื่อชดเชยการกัดที่ขอบของลายพอลิเมอร์ได้ให้มีผลต่อบริเวณที่ไม่ถูก Etching back ให้มีขนาดกว้างขึ้น



รูปที่ 3.22 (ก) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back และ (ข) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back ที่กำลังขยาย 50 เท่า

3.5 สรุป

ในบทนี้เป็นขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยการแพร่ความร้อนเพียงครั้งเดียว โดยแหล่งสารเจือได้จากสารละลาย PSG ink และชั้น PSG film สร้างด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงและการพิมพ์ลาย โดยวิธีการหมุนเหวี่ยงใช้สำหรับสร้างชั้นฟิล์มสำหรับการสร้างชั้นรับแสง n-Si และวิธีการพิมพ์ลายใช้สำหรับการสร้างฟิล์ม n^{++} -Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า รวมไปถึงการสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณด้วยวิธี Etching back โดยอาศัยวิธีการประทับลวดลายลงบนชั้น n-Si เพื่อป้องกันพื้นที่ที่ไม่ต้องการโดนสกัดขณะทำ Etching back เมื่อทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าและทางแสงในบทที่ 4



บทที่ 4

การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า ทางแสง และทางโครงสร้างระดับจุลภาค ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซีเลกทีฟอิมิตเตอร์

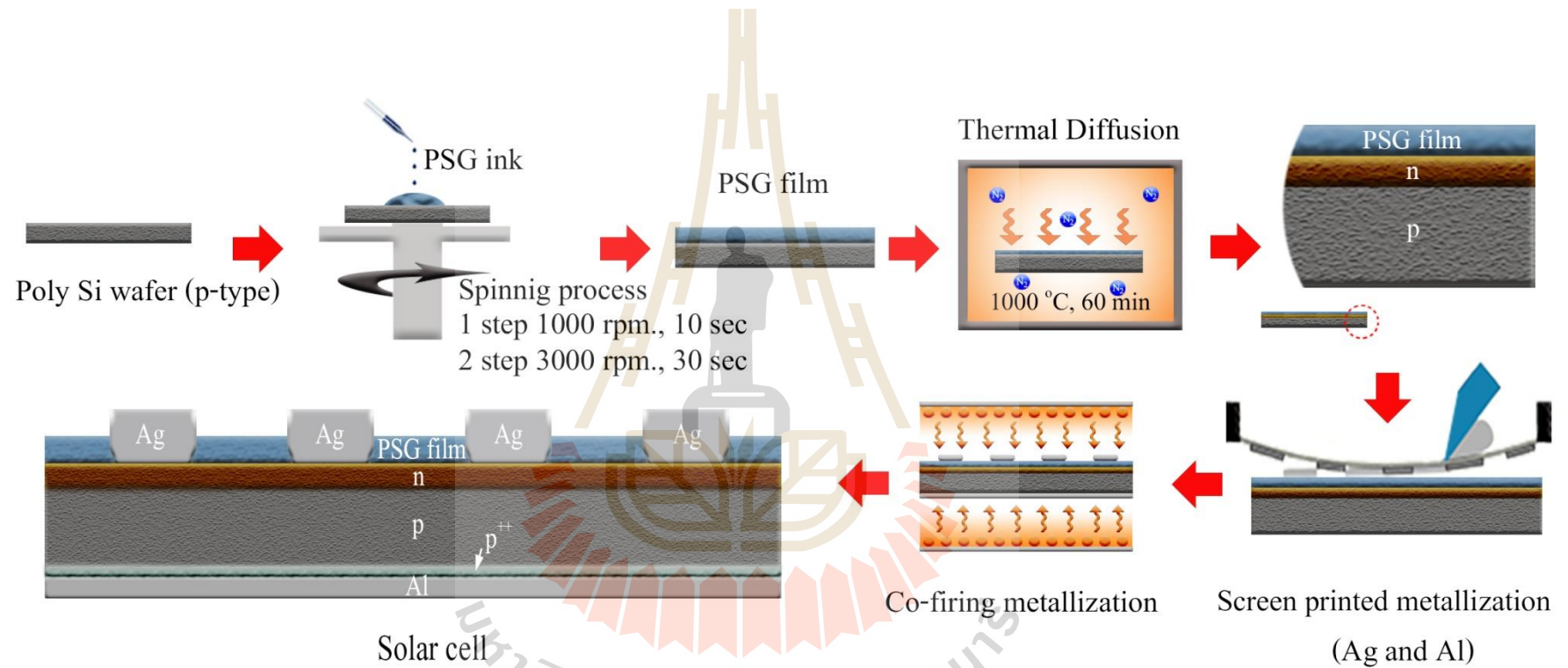
4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้เตรียมสารละลาย SOD (Spin on Doped) หรือ PSG ink เพื่อเป็นแหล่งสารเจือให้กับเทคนิคการแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion) เพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si จากการเตรียมสารละลาย PSG ink ความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสต่างกัน ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si มีค่าต่างกัน และจากการแพร่เพื่อสร้างชั้น n-Si ด้วยสารละลาย PSG ink ผู้ศึกษาได้นำชั้น n-Si ที่ได้จากการแพร่มาผ่านกระบวนการ Etching back เพื่อที่จะสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นในบทที่ 4 ผู้ศึกษาจะกล่าวถึงผลการวัดและวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าทางโครงสร้างระดับจุลภาค การวิเคราะห์ค่าทางแสง และการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า โดยที่ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบทั่วไป และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell) ซึ่งสร้างขึ้นด้วย 3 วิธีคือ วิธีการสร้างลงด้วยแสง วิธี SSOD (Spin and Screen on Doped) และวิธีการประทับลาย (Stamping) ได้แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิคสารละลายหมุนเหวี่ยง (Spin on Doped, SOD) และการพิมพ์ลาย (Screen printing)

จากการเตรียมสาร PSG ink ในบทที่ 3 ผู้ศึกษาจึงได้นำสารละลาย PSG ink มาเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการแพร่ด้วยความร้อน เพื่อสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si โดยการเปรียบเทียบการผลิตระหว่างเทคนิค SOD และการพิมพ์ลาย ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 4.1

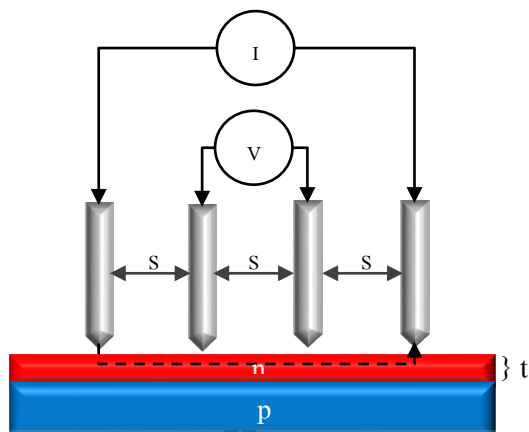


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค SOD

รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค SOD โดยจะอธิบายรายละเอียดการสร้างดังนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิด Poly ขนาด $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ ด้วยวิธีการ RCA1 และ RCA2 และวางบนแท่นหมุนเหวี่ยง
2. หยดสารละลาย PSG ink ลงบนแผ่นซิลิคอน แล้วเริ่มขั้นตอนการหมุนเหวี่ยง โดยที่ความเร็วในการหมุนเหวี่ยงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ทำการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที นาน 10 วินาที ขั้นตอนที่ 2 ทำการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที จะได้ชั้นของฟิล์ม PSG เป็นแหล่งสารเจือสำหรับการแพร่ต่อไป
3. นำชิ้นงานไปเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่สารเจือของงานวิจัยนี้เท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (N_2) บริสุทธิ์ 99.99% ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm จะส่งผลให้เกิดชั้น n-Si เป็นโครงสร้างรอยต่อ p/n-Si และเกิดฟิล์ม PSG ที่หนาขึ้นเล็กน้อยบนชั้น n-Si แสดงในรูปที่ 4.1
4. หลังจากนั้น นำชิ้นงานที่ได้มาผ่านสารละลาย HF5% เป็นเวลา 30 วินาที จะทำให้ชั้นของฟิล์ม PSG บางลงและเหมาะสมสำหรับนำไปสร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกับให้กับเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si
5. เมื่อได้ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับแล้วให้นำรอยต่อ p/n-Si ไปทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 จากนั้นให้นำไปสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านหลังด้วยวิธีการพิมพ์ลาย (Screen printed)
6. หลังจากการสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านหลังแล้ว นำชิ้นงานไปผ่านอุณหภูมิสูง 930 องศาเซลเซียส สำหรับขั้วไฟฟ้าด้านบน (Ag) และ 530 องศาเซลเซียส สำหรับขั้วไฟฟ้าด้านหลัง พร้อมกันเป็นเวลา 6 วินาที เรียกขั้นตอนนี้ว่า Co-firing metallization
7. หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอน Co-firing metallization จะได้เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิควิธีของ SOD

หลังจากผลิตชิ้นงานได้วัดผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (Sheet Resistance, ρ_{Sheet}) ของชั้น n-Si ด้วยเทคนิคการวัดแบบ 4-point probes เพื่อวัด ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si เนื่องจากแหล่งสารเจือ PSG ink มีเงื่อนไขความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่างกันจึงทำให้ค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าไม่เท่ากันเช่นกัน และการวัดค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si ใช้หลักการวัดแบบ 4-point probes มีระยะห่างระหว่างเข็มทั้ง 4 ห่างเท่ากับ S กระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับแท่งเข็มคู่นอก และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของแท่งเข็มคู่ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.2 ρ_{Sheet} หาได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ด้วย 4-point probes

สมการที่ (4.1) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity, $\Omega \cdot cm$) ของการวัดแบบ 4-point probes

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} t \approx 4.532 \frac{V}{I} t \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) สามารถหาค่า ρ_{Sheet} ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\rho_{Sheet} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ คือค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น $\Omega \cdot cm$

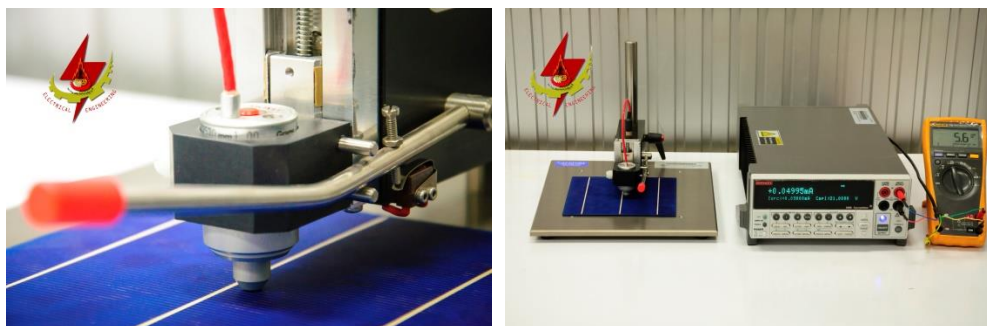
ρ_{Sheet} คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นมีหน่วยเป็น Ω/Sq

V คือแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น mV

I คือกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น mA

t คือความหนาของชั้น n-Si มีหน่วยเป็น μm

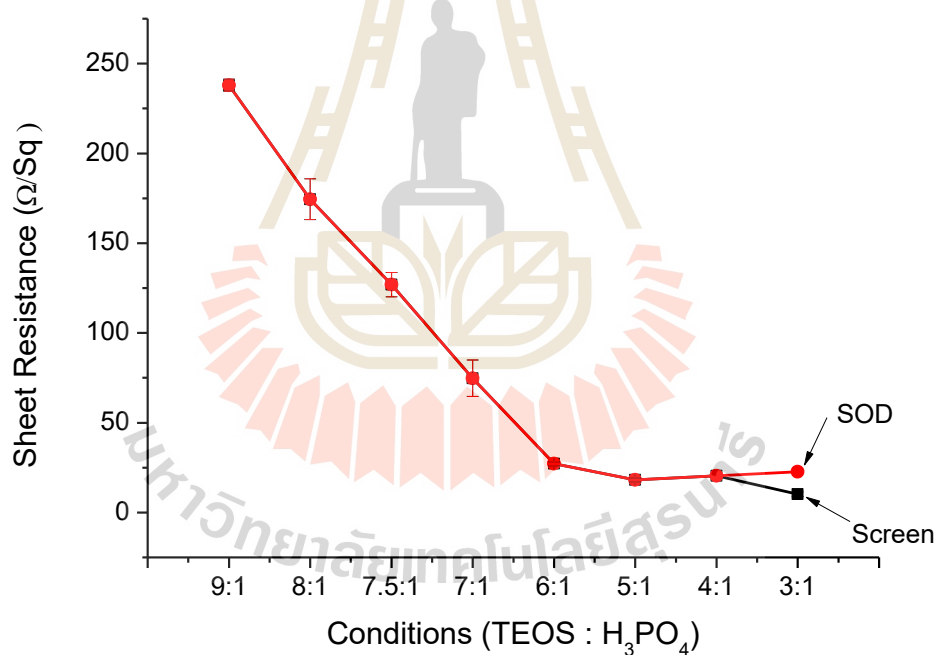
ในงานวิจัยนี้ ได้วัดค่า ρ_{Sheet} จะวัดด้วยเครื่อง 4-point probe รุ่น Jandel Cylindrical four point probe และใช้เครื่องวัด Electrometer ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 2400 และเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากหัวโพรบ โดยเครื่อง Digital multi-meter ยี่ห้อ FLUK รุ่น 179 ดังรูปที่ 4.3



(ก)

(ข)

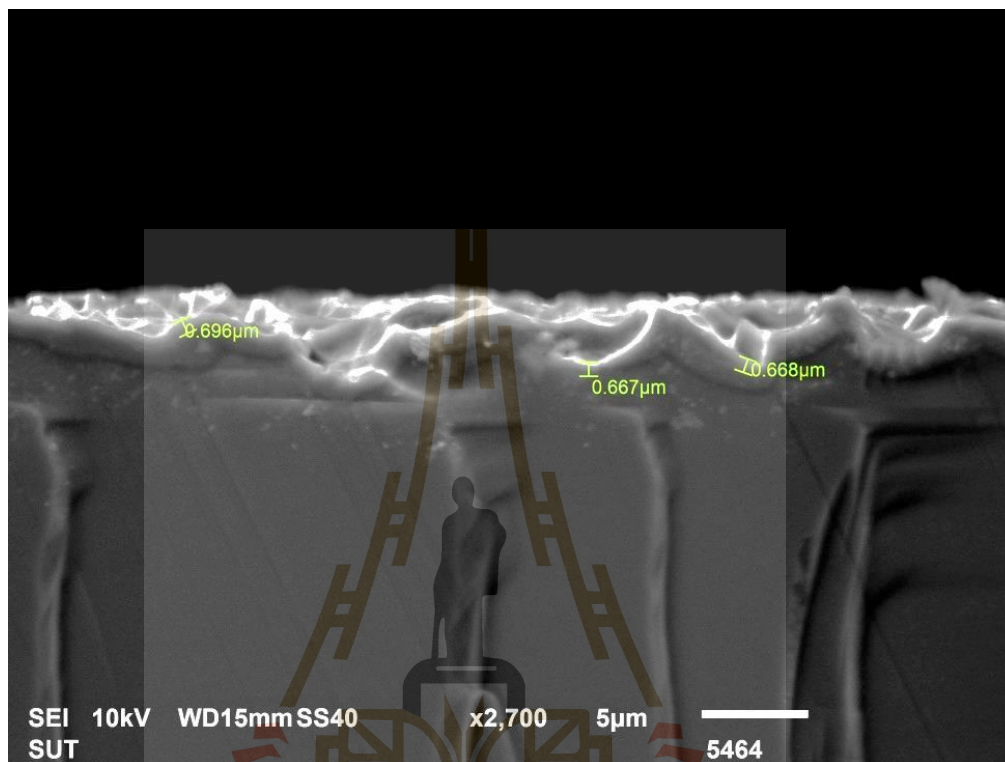
รูปที่ 4.3 (ก) การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น 4-point probes (ข) ส่วนประกอบการวัดค่า ρ_{Sheet} ด้วย KEITHLEY 2400 และ Digital multi-meter FLUKE 179



รูปที่ 4.4 กราฟค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si ภายใต้เงื่อนไข TEOS : H₃PO₄

จากผลการวัดค่าทางไฟฟ้า พบว่าชั้น n-Si ที่ได้จากการแพร่แหล่งสารเจือในเงื่อนไขที่ใช้ PSG ink ในสัดส่วน 9:1 (P = 0.30 %at.) ที่อุณหภูมิ 1000 °C นาน 60 นาที ให้ค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 237.93 Ω/Sq และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะตอมฟอสฟอรัส พบว่าผลของค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si จะลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปกราฟที่ 4.4 ซึ่งจากการทดลองนี้

ทำให้สามารถสร้างชั้น n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และเลือกช่วงค่า ρ_{Sheet} ที่เหมาะสมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกค่า ρ_{Sheet} มีค่าอยู่ในช่วง 50 Ω/Sq ถึง 160 Ω/Sq เพื่อใช้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค SOD



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายรอยต่อ p/n-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือด้วยความร้อนบน Poly-Si

จากรูปที่ 4.5 คือภาพถ่ายรอยต่อ p/n-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือด้วยความร้อน เหนือ TEOS:H₃PO₄ = 4:1 บนแผ่นฐานซิลิคอน เพื่อวัดค่าความลึกของชั้น n-Si ซึ่งก่อนที่จะทำการแพร่สารเจือผู้ศึกษาได้ทำการคำนวณความลึกของชั้น n-Si ไว้ 2 วิธีคือ วิธีที่ 1.Fick's first law และ วิธีที่ 2.Gaussian Distribution โดยที่แสดงรายละเอียดของตัวอย่างการคำนวณ และผลการคำนวณค่าความลึกทั้ง 2 วิธี ไว้ในภาคผนวก ค จากการคำนวณพบว่าวิธีการคำนวณหาค่าความลึกของชั้น n-Si แบบ Fick's first law ซึ่งเป็นการคำนวณแบบไม่จำกัดแหล่งสารเจือ นั้นให้ผลค่าความลึกเนื่องจากการแพร่สารเจือ 4:1 เท่ากับ 0.41 μm และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าความลึกของชั้น n-Si ด้วยวิธีของ Gaussian Distribution เป็นการคำนวณแบบจำกัดแหล่งสารเจือ พบว่าค่าความลึกของชั้น n-Si เหนือ 4:1 เท่ากับ 0.44 μm จากนั้นผู้ศึกษาได้ทำการแพร่สารเจือแล้วนำไปวัดความลึกของชั้น n-Si ด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM จากรูปที่ 4.5 สามารถวัดความลึกของชั้น n-Si ได้และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.68 μm ซึ่งมีค่ามากกว่าทั้งสองวิธีประมาณ 40% เนื่องจากระบบในห้องปฏิบัติการ

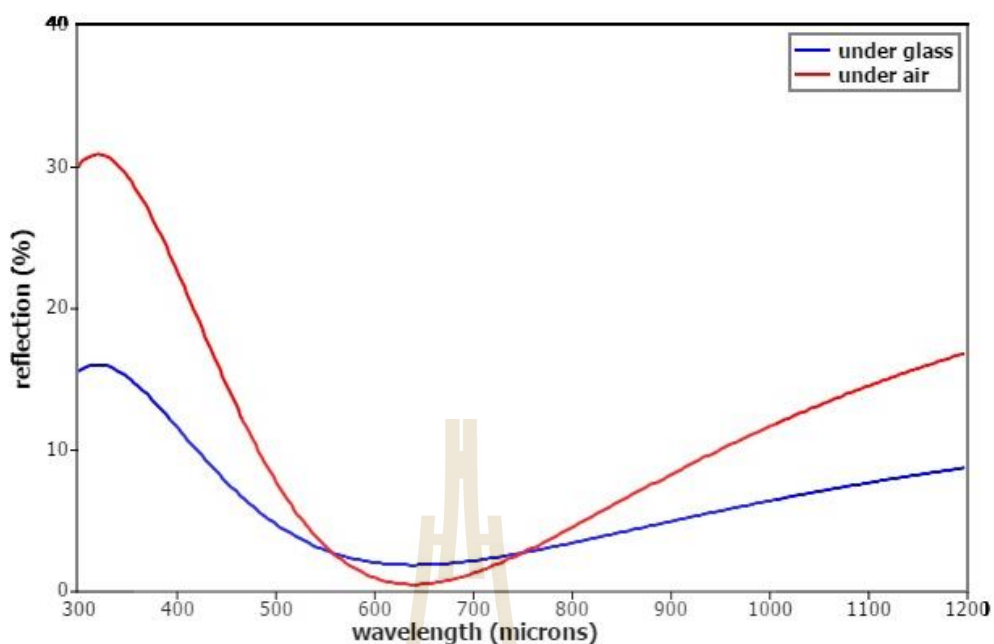
ไม่สามารถนำชิ้นงานออกมาได้ภายในเวลาที่กำหนด อุณหภูมิจะต้องต่ำกว่า 200°C จึงจะสามารถนำชิ้นงานออกมาได้ ดังนั้นเวลาที่ยาวนานขึ้นส่งผลให้ชั้น n-Si หนาขึ้น

4.2.1 ผลของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC) ด้วยฟิล์ม PSG (Phosphorus Silicate Glass)

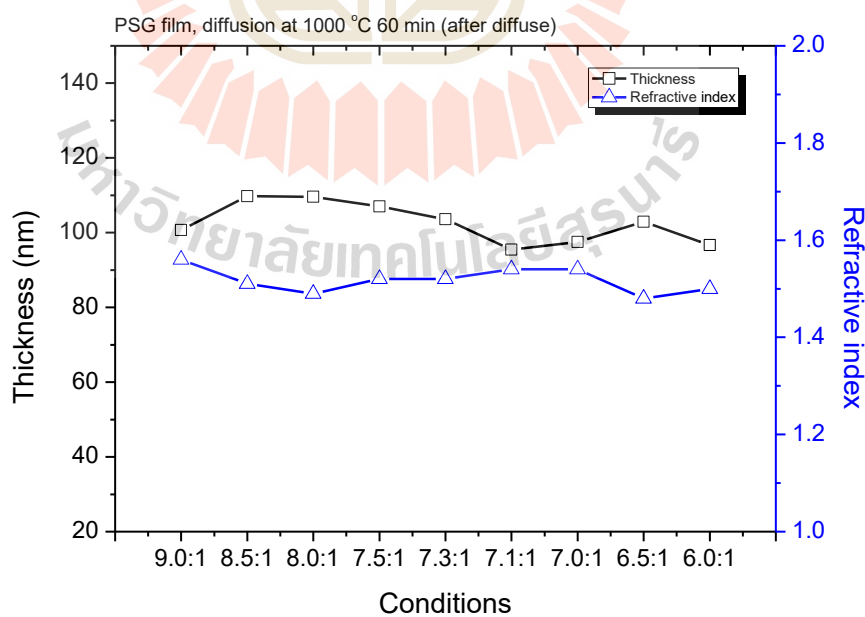
หลังจากการสร้างรอยต่อ p/n-Si แล้ว เซลล์แสงอาทิตย์ยังจำเป็นต้องมีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC) เพื่อช่วยลดผลของการสะท้อนแสงกลับที่ผิว และเป็นชั้นพาสซีเวชัน (Passivation) เพื่อลดผลของค่าความเร็วการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว n-Si ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียจากแสงสะท้อนกลับที่ผิวเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีชั้น ARC เคลือบอยู่บนด้านรับแสงหรือชั้น n-Si จากผลของชั้น ARC จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเลือกวัสดุมาเป็นชั้น ARC ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตจะใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งมีราคาแพง ในงานวิจัยนี้ได้นำชั้น PSG สร้างเป็นชั้น ARC ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้หลังจากการแพร่ ดังนั้นต้นทุนจึงต่ำกว่าการผลิตในระบบสุญญากาศพิเศษ

เนื่องจากชั้นของ PSG film ที่หนา 100 nm ถึง 110 nm สามารถช่วยลดผลของ %R ได้เล็กน้อย ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ศึกษาผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและค่าดัชนีการหักเหของแสง (n) ที่มีผลต่อ %R ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ จากสมการ (3.5) ในบทที่ 3 จากรูปที่ 4.5 พบว่าความหนาและค่า n มีผลกระทบต่อ %R จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่ความหนา 80 nm มี $n = 2$ ในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นให้พลังงานมากที่สุดบนโลก และเป็นช่วงการสะท้อนกลับของโฟตอนต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน ดังนั้นความหนาและค่าดัชนีหักเหของแสงที่กล่าวมานี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นชั้น ARC ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

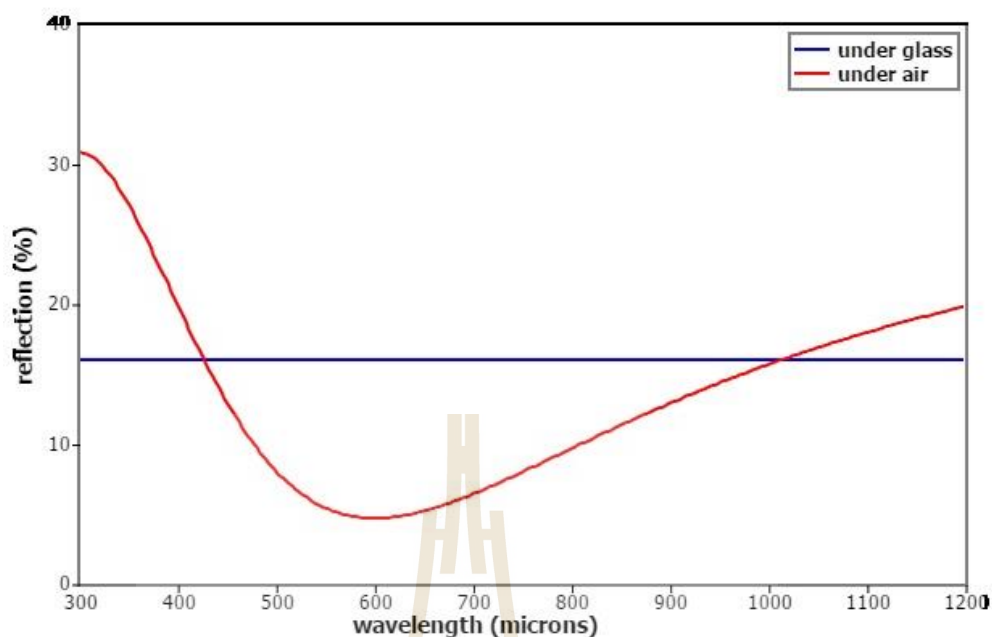
ชิ้นงานโครงสร้าง PSG/n/p-Si มีความหนามากกว่า 110 nm นำมาวิเคราะห์ทางแสงด้วยเครื่อง UV VIS รุ่น Cary 300 พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 280 ถึง 800 nm ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับที่ผิว (%WR) เท่ากับ 9.78WR% เมื่อทำการปรับปรุงโดยมีชั้น PSG หนาอยู่ในช่วง 100 ถึง 110 nm ที่ได้จากการแพร่ พบว่าค่า %WR มีค่าเท่ากับ 9.94WR% เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 280 ถึง 549 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่วัสดุซิลิคอนสามารถดูดกลืนคลื่นได้มาก พบว่าแผ่นฐานซิลิคอนมีค่า %WR ถึง 16.75% และเมื่อปรับปรุงด้วยฟิล์ม PSG แล้วสามารถลดค่า %WR มีค่าเท่ากับ 9.02WR% แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.6 กราฟการจำลองทางคณิตศาสตร์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของแสงที่เหมาะสม ที่มีผลต่อการสะท้อนกลับของโฟตอนน้อยที่สุด (<http://pveducation.org/pvcdrom/anti-reflection-coatings>)

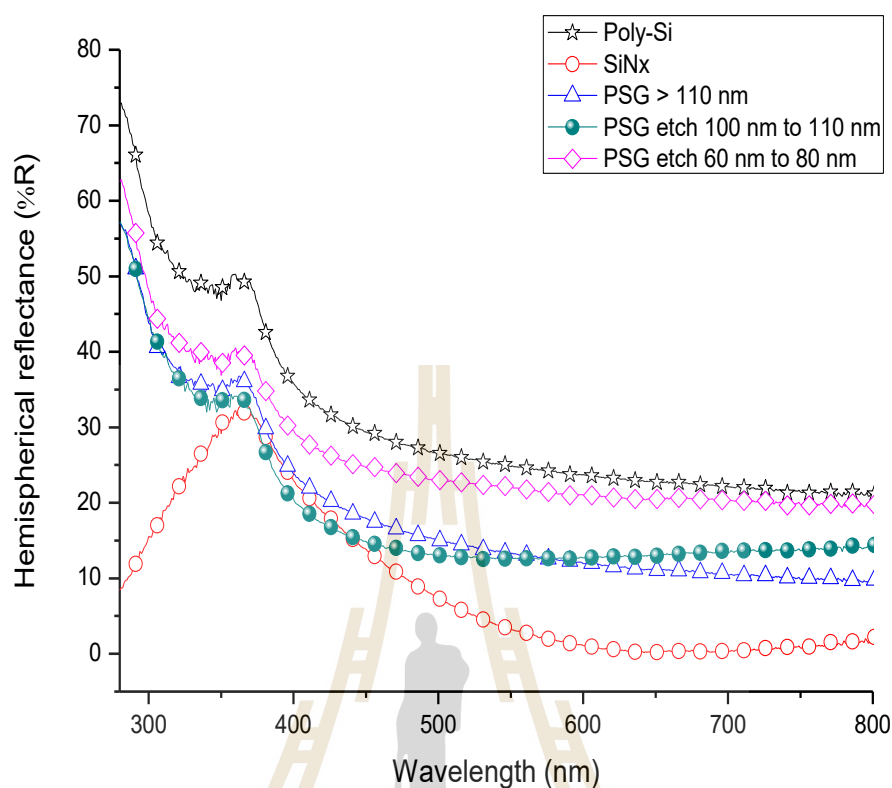


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและค่าดัชนีหักเหของแสงของชั้น PSG ที่วัดด้วยเครื่อง Ellipsometer ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมสารเจือในสัดส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 กราฟการจำลองค่า %R ภายใต้เงื่อนไขของค่าความหนาฟิล์ม 100 nm และ $n = 1.5$
(<http://pveducation.org/pvcdrom/anti-reflection-coatings>)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดความหนาและค่า n ของชั้น PSG film ด้วยเครื่อง Ellipsometer รุ่น SE400 advanced ซึ่งมีความหนาอยู่ในช่วง 100 ถึง 110 นาโนเมตร และค่า n อยู่ในช่วง 1.48 ถึง 1.56 ดังรูปกราฟที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสไม่มีผลกระทบต่อความหนาและค่า n ของชั้น PSG film เมื่อนำค่าที่วัดได้ไปจำลองผลของ %R ดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่ความหนา 100 นาโนเมตร และค่า n เท่ากับ 1.5 มี %R น้อยที่สุด ดังนั้นที่ความหนาและค่า n นี้เหมาะสมที่จะนำไปสร้างชั้น ARC ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพัทธ์ระหว่าง %R และความยาวคลื่นแสงในช่วง 190 nm ถึง 850 nm ของชั้น ARC บนแผ่นฐานซิลิคอน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าความหนาของชั้น PSG ที่เหมาะสมสำหรับเป็นชั้น ARC ควรมีค่าประมาณ 100 nm บนพื้นฐานการพิจารณาของแบบจำลองในรูปที่ 4.8 ซึ่งจะสามารถลดการสูญเสียการสะท้อนกลับของโฟตอนได้ถึง 9.94%WR โดยไม่ใช่เทคโนโลยีขั้นสูงซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

อย่างไรก็ตามชั้น ARC SiNx ของเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงงานอุตสาหกรรม นั้นมีความหนาอยู่ที่ 75 nm ถึง 80 nm ค่า n มีค่าเท่ากับ 2.1 และเมื่อนำไปวัดค่าสะท้อนกลับของโฟตอนเทียบกับแผ่นฐาน Si พบว่าค่าเฉลี่ย %R ระหว่างความยาวคลื่น 280 nm ถึง 800 nm มีค่าลดลงเท่ากับ 4.08%WR อย่างไรก็ตามขั้นตอนในการผลิตชั้น SiNx จะต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง และประกอบกับต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้เลือกใช้ชั้น PSG film มาสร้างเป็นชั้น ARC เพื่อลดต้นทุนการผลิต

4.2.2 ผลการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค Spin on Doped (SOD)

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ด้วยเทคนิค SOD

Condition (TEOS : H ₃ PO ₄)	ρ_{Sheet} (Ω/Sq)	V _{oc} (v)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
SOD1 (9.0 : 1)	155.68	0.5	27.12	0.57	7.73
SOD2 (8.5 : 1)	130.52	0.52	26.82	0.61	8.35
SOD3 (8.0 : 1)	95.17	0.49	26.32	0.55	7.07
SOD4 (7.5 : 1)	130.52	0.46	23.17	0.45	4.78
SOD5 (7.3 : 1)	74.32	0.50	27.12	0.59	8.07
SOD6 (7.0 : 1)	121.46	0.51	29.26	0.62	9.34
SOD7 (6.5 : 1)	55.97	0.51	29.00	0.56	8.22
SOD8 (6.0 : 1)	77.50	0.51	27.85	0.58	8.25

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง WACOM Electric Super Solar Simulator ของสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้การจำลองแสงสเปกตรัม AM 1.5 มีความเข้มข้นของแสงมาตรฐานเท่ากับ 1 kW-m² ผลการวัดพบว่าการสร้างชั้น n-Si emitter เพื่อเป็นชั้นรับแสง ซึ่งผลิตด้วยวิธี SOD ในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ให้มีประสิทธิภาพการแปลงงาน ประมาณ 9.34% และ FF ที่สูงประมาณ 0.61 ให้เงื่อนไขการผลิต SOD6 (TEOS:H₃PO₄ = 7.0 : 1) อย่างไรก็ตามการแพร่สารเจือด้วยสารละลาย PSG หรือเทคนิค SOD นี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความสม่ำเสมอของชั้น n ที่ได้ แม้ว่ามีก๊าซไนโตรเจนไหลในระบบ แต่ระบบเตาการแพร่ในห้องปฏิบัติการเป็นระบบเปิดกับอากาศปกติ ทำให้ชั้น n-Si ที่เกิดขึ้นอาจไม่มีความสม่ำเสมอเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามวิธี SOD ยังจัดว่ามีข้อดีสำหรับเทคนิคต้นทุนต่ำ

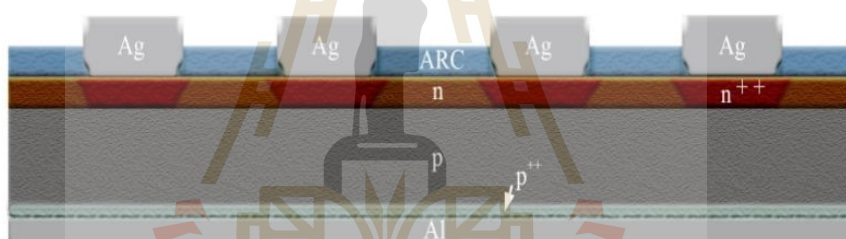
4.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ชนิดซีเลกทีฟอิมิตเตอร์ (SE cell)

จากข้อจำกัดของการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น n-Si ที่มีค่าความเข้มข้นสารเจือแบบสม่ำเสมอในหัวข้อ 4.2 ดังนั้น SE cell ที่ประกอบไปด้วยบริเวณรับแสง Lightly doped n-Si และบริเวณ Heavily doped n⁺⁺-Si ซึ่งอยู่ได้ขั้วไฟฟ้าสามารถเป็นทางเลือกอย่างหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้ วิธีการสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณนั้นสามารถสร้างได้

หลากหลายวิธีเช่น การสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณ ด้วยวิธีการแพร่เฉพาะบริเวณด้วยแสงเลเซอร์ (Laser doped) วิธีการแพร่ที่อาศัยกระบวนการของลวดลายทางแสง (Photolithography process) วิธีการพิมพ์ลาย (Screen printing) วิธีการประทับลาย (Stamping) และอื่น ๆ ในการศึกษานี้ได้พิจารณาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ จึงเลือกศึกษาเทคนิคการพิมพ์ลาย และการประทับลาย โดยเบื้องต้น ได้ศึกษาผลของโครงสร้าง SE กับความแตกต่างของประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ด้วยวิธีการผลิตที่ใช้การสร้างลวดลายด้วยแสง

โครงสร้างหลักของ SE cell จะประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10

1. ขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (Ag contact)
2. ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC)
3. ชั้น Lightly doped n-Si และชั้น Heavily doped n^{++} -Si
4. แผ่นฐาน p-Si และชั้นสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back surface field, BSF) p^{++} -Si
5. ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (Al contact)



Selective Emitter Solar cell

รูปที่ 4.10 โครงสร้าง SE cell

4.3.1 การสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography process)

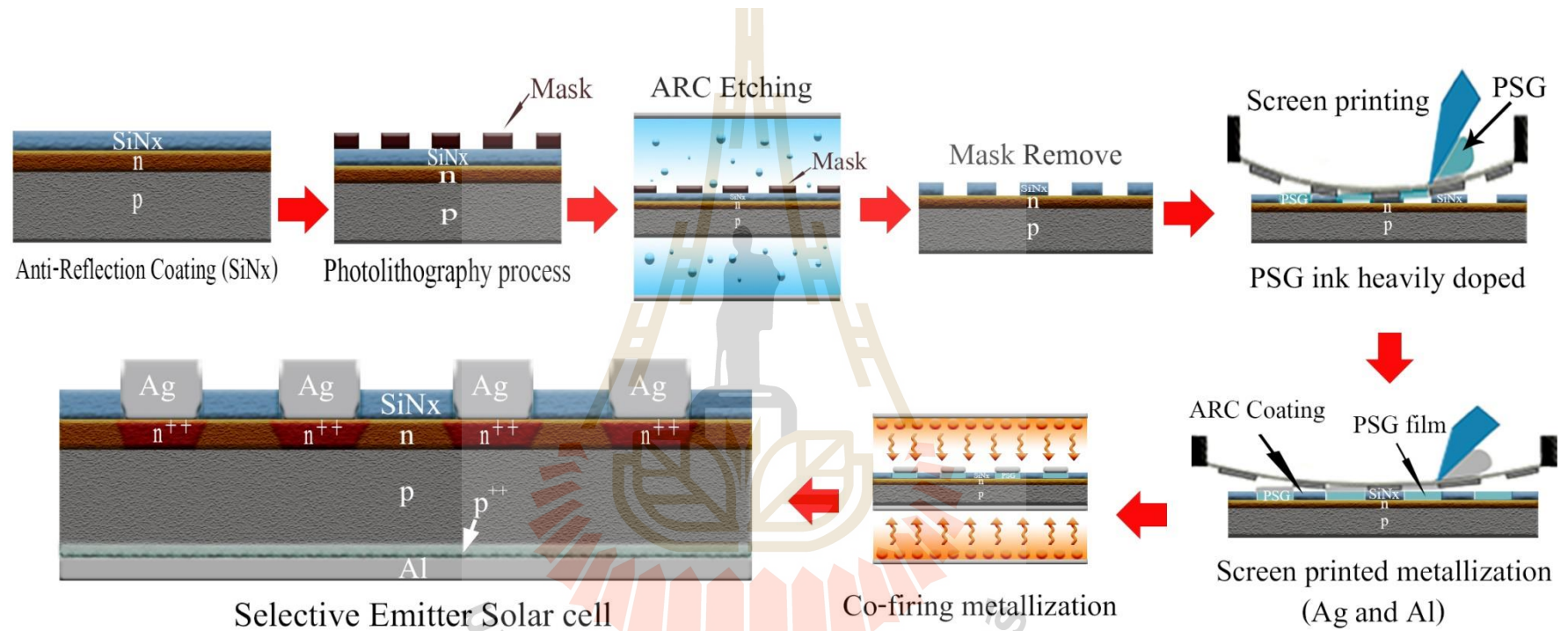
เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง ในการศึกษาี้ เพื่อใช้สกัดชั้น SiN_x ให้เกิดเป็นช่องเปิดบางบริเวณ และทำการพิมพ์ลายของสารละลาย PSG เข้มข้นสูง เพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเข้าไปในช่องเปิดของ n-Si เพื่อให้บริเวณดังกล่าวเกิดเป็นชั้น Heavily doped n^{++} -Si สำหรับ SE solar cell มีขั้นตอนการสร้างดังรูปที่ 4.11

ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ศึกษาได้ใช้เซลล์รอยต่อ p/n-Si และชั้น ARC ที่ผลิตจากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) โดยที่ชั้น n-Si มีค่า ρ_{Sheet} อยู่ในช่วง $90 \Omega/Sq$ ถึง $95 \Omega/Sq$ มีความหนาของชั้น ARC อยู่ในช่วง 75 นาโนเมตร ถึง 80 นาโนเมตร และมีค่า n มีค่าเท่ากับ 2.1 อย่างไรก็ตาม

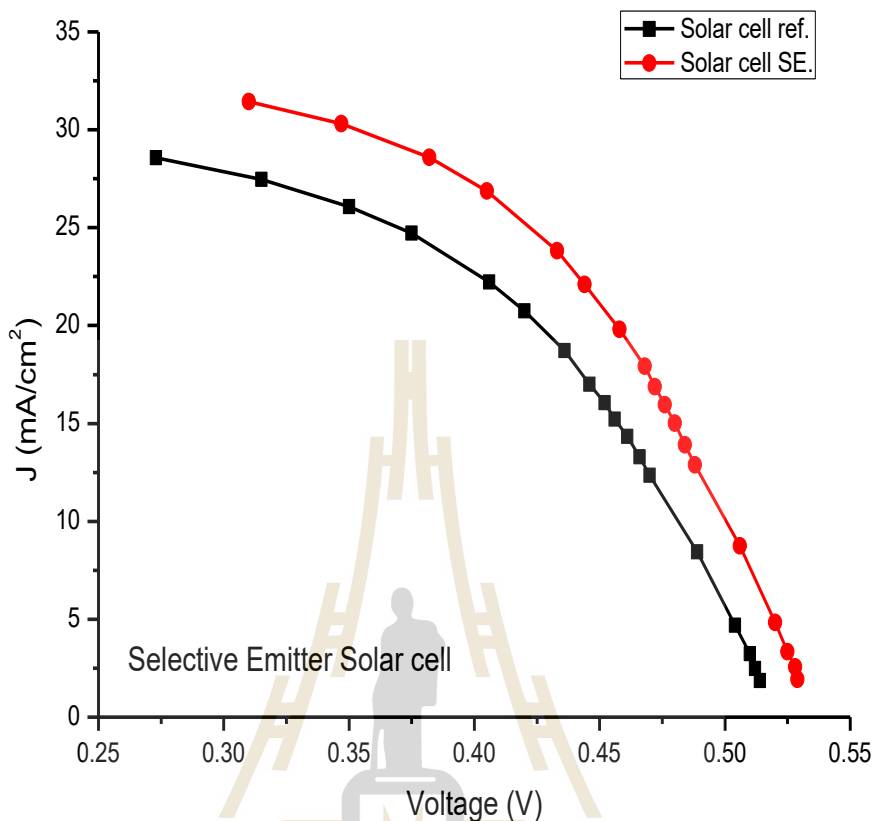
ตามการสร้างขั้วไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ห้องปฏิบัติการ และมีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาและขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นจึงมีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์ที่ผลิตจากโรงงาน

การสร้าง SE cell บนโครงสร้าง ARC/n-Si/p-Si substrate นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำกากในการเปิดช่องของชั้น ARC หรือชั้น SiN_x เนื่องจากสารเจือไม่สามารถแพร่ซึมผ่านชั้น SiN_x ได้ภายใต้กระบวนการ Fast firing ดังนั้นในขั้นตอนการสร้างน้ำกากจึงต้องอาศัยการสร้างลวดลายด้วยแสง หรือที่เรียกว่า Photolithography process ซึ่งวิธีนี้สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กได้ดี ได้ลวดลายตามที่ต้องการ และสามารถทดการกัดกร่อนของกรดและด่างได้

หลังจากได้ลวดลายของน้ำกากป้องกันการสกัดของสารเคมีซึ่งเคลือบบนชั้น SiN_x จากนั้นนำจุ่มลงในสารละลาย $\text{HF}5\%$ นาน 15 นาที จึงทำให้ชั้น SiN_x ถูกกัดผิวหลุดออกไปในบริเวณที่เปิดช่องของน้ำกาก เมื่อได้ช่องเปิด SiN_x จากนั้นพิมพ์ลายด้วยสารละลาย PSG ink ที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน $\text{TEOS}:\text{H}_3\text{PO}_4$ เท่ากับ 3:1 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์อะตอมฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.86 %at. และนำไปอบที่ 200 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นนำไปสู่ขั้นตอนการพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้า ด้านบนและด้านหลัง ในที่นี้ขั้วไฟฟ้านบนจะเป็นโลหะเงิน (Ag) และขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเป็นโลหะอะลูมิเนียม (Al) เมื่อสร้างขั้วไฟฟ้านบนและด้านหลังแล้ว ให้นำไปเข้าเครื่อง Co-firing เพื่อนำไปผ่านความร้อนด้วยความเร็วสูง โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 930°C และ 850°C เป็นเวลา 6 วินาที จะทำให้ได้ SE cell ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคของการขึ้นลวดลายด้วยแสง



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการสร้างหลายด้วยแสง



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ของ SE cell ด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงเทียบกับเซลล์อ้างอิงรอยต่อ p/n

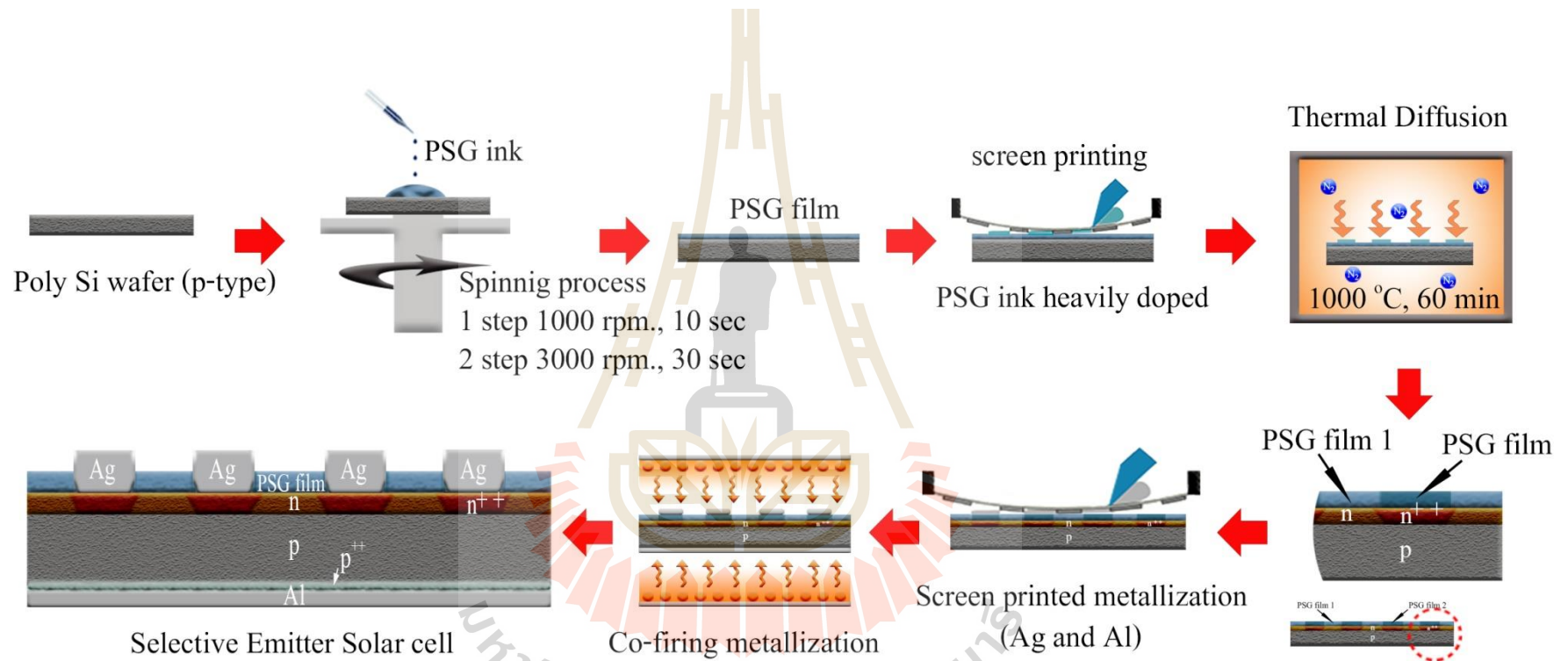
จากผลที่แสดงในรูปกราฟที่ 4.12 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE สามารถปรับปรุงค่า I_{sc} เพิ่มขึ้นประมาณ 3.93 A หรือ 11.18% และ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.02 V หรือ 3.57% รวมถึงความสามารถในการปรับปรุงค่า FF ให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์โครงสร้างพื้นฐาน ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้นประมาณ 1.74% เมื่อเทียบกับเซลล์โครงสร้างมาตรฐาน จากผลการทดลองดังกล่าวเป็นข้อมูลที่สำคัญเพื่อแสดงให้เห็นว่าการสร้างบริเวณ n^{++} -Si ได้ด้วยไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ลายของสารละลาย PSG ความเข้มข้นสูง สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตามการเปิดช่องในบริเวณ n^{++} -Si ด้วยเทคนิค Photolithography นั้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ดังนั้นในการศึกษานี้ได้สร้างชั้น Lightly doped n-Si และบริเวณ Heavily doped n^{++} -Si ด้วยวิธี SOD เพื่อสร้างชั้นรับแสง n-Si ในเงื่อนไขความเข้มข้นสารเจือต่าง ๆ กัน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.2 การวัดค่าประสิทธิภาพของ SE cell ด้วยเทคนิคการขึ้นลวดลายด้วยแสง

Condition	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF	$\eta(\%)$	Efficiency Gain (%)
Solar cell Ref.	0.54	31.23	0.55	9.78	0
Solar cell SE.	0.56	35.16	0.56	11.52	1.74

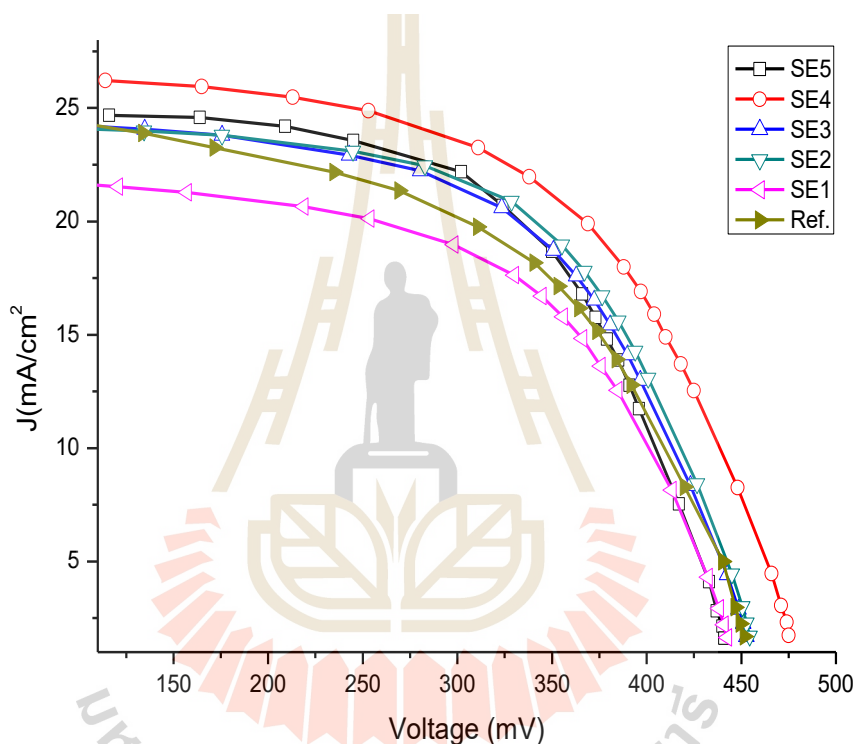
4.3.2 การสร้าง SE cell ด้วยวิธี SOD และเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing)

จากผลการสร้างบริเวณ Heavily doped n^{++} -Si ด้วยสารละลาย PSG เข้มข้นสูงได้ที่ห้องปฏิบัติการ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวทางการสังเคราะห์สารละลายเข้มข้นต่ำ เพื่อสร้างบริเวณรับแสง n -Si ขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้าง SE cell จากเทคนิคต้นทุนต่ำด้วยวิธีพิมพ์ลายของสารละลาย PSG เพื่อลดข้อจำกัดของเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงที่มีความซับซ้อนไม่เหมาะกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยได้ศึกษาการสังเคราะห์สารละลาย PSG รายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 และนำมาพิมพ์ลายเพื่อให้เกิดการแพร่ในบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ากริด เทคนิคนี้มีจุดเด่นในการสร้างบริเวณ lightly doped n -Si และ heavily doped n^{++} -Si ภายใต้กระบวนการแพร่ด้วยความร้อนเพียงครั้งเดียว ซึ่งแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 4.13 เทคนิคการพิมพ์ลายขั้นตอนนี้แตกต่างจากการใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงในส่วนการเปิดช่องซึ่งเทคนิคพิมพ์ลายไม่ใช้หน้ากากป้องกันเคมี แต่ใช้การพิมพ์ลายโดยตรงด้วยสารละลาย PSG เข้มข้นสูง ซึ่งมีอัตราส่วนของ $TEOS:H_3PO_4$ เท่ากับ 3:1 (0.86 %at.) เพื่อให้เกิดลวดลายฟิล์ม PSG ที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบนและนำไปเข้าสู่กระบวนการแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion process) จะทำให้เกิดชั้น n -Si 2 บริเวณ และชั้นฟิล์ม PSG เพิ่มขึ้นจากการแพร่ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำชั้นฟิล์ม PSG มาใช้เป็นชั้น ARC ในเงื่อนไขทางแสงที่เหมาะสมแสดงในหัวข้อที่ 4.2 จากนั้นให้นำรอยต่อ p/n -Si มาพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าลายกริดด้านบนให้ตรงบริเวณ n^{++} -Si และพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านหลังด้วย Al paste หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านความร้อนอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 850 °C และ 930 °C เป็นเวลา 6 วินาที SE cell ที่ศึกษานี้สามารถสร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย และใช้การแพร่สารเจือเพียงครั้งเดียว



รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลวดลาย (Screen printing)

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์แหล่งสารเจือสำหรับสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณ สำหรับบริเวณรับแสง n-Si และ n^{++} -Si บริเวณได้ขั้วไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ผลิตบริเวณรับแสง n-Si ในเงื่อนไขของความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นมีค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งผลิตให้มีค่าเท่ากับ $55.97 \Omega/\text{Sq}$ $74.32 \Omega/\text{Sq}$ $95.17 \Omega/\text{Sq}$ $130.52 \Omega/\text{Sq}$ และ $155.68 \Omega/\text{Sq}$ และได้เลือกใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของบริเวณได้ขั้วไฟฟ้า n^{++} -Si หรือบริเวณ Heavily dope มีค่าเท่ากับ $22.66 \Omega/\text{Sq}$



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ของ SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย

รูปที่ 4.14 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นในเงื่อนไขต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ผลในตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานในเงื่อนไข SE4 ซึ่งมีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ $130.52 \Omega/\text{Sq}$ ให้ค่า V_{OC} และค่า J_{SC} สูงกว่าเงื่อนไขอื่น เนื่องจากรอยต่อ p/n-Si ดีขึ้นสามารถดูดกลืนแสงสีน้ำเงินได้ดีและค่า ρ_{Sheet} ของ n-Si ที่มีค่าสูงส่งผลต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะที่สูงขึ้น อีกทั้งบริเวณได้ขั้วไฟฟ้ายังให้อิโหม้มิกที่ดี สังเกตจากค่า FF ที่สูงกว่าชิ้นงาน Ref. จึงทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าชิ้นงาน Ref. เท่ากับ 1.47% แต่ผลของ FF มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานในเงื่อนไข SE3 ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ Fast

firing ที่ชั่วไฟฟ้านั้นยังไม่เหมาะสมหรือการแพร่สารเจือสามารถปรับปรุงให้เกิดชั้น n-Si สมำเสมอได้จากลดความดันในบรรยากาศในกระบวนการแพร่ จะทำให้ค่า FF สูงขึ้น สามารถให้ประสิทธิภาพของชิ้นงาน SE4 มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si สูงขึ้นเป็น 155.68 Ω/Sq แสดงค่าประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอิทธิพลของการเกิด Dead layer ซึ่งลดความสามารถหรือความน่าจะเป็นในการรวบรวมพาหะ (Collection probability) ให้ต่ำลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อชั้นรับแสง n-Si แพร่สารเจือสูง ๆ เกิด ρ_{Sheet} ต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเส้นทางของพาหะ (Carrier Transport) เกิด Auger recombination สูงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง

การทดสอบในเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างบริเวณ n^{++} -Si จากการเปรียบเทียบชิ้นงาน Ref. และ SE3 ที่มีค่า ρ_{Sheet} ของ n-Si เท่ากับ 95.17 Ω/Sq พบว่าให้ค่า FF สูงกว่าชิ้นงาน Ref. เท่ากับ 0.09 หรือ 9% อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของแหล่งสารเจือ PSG มีผลต่อการแพร่ซึมค่า ρ_{Sheet} และความลึกของ n-Si ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE ด้วยการใช้สารละลาย PSG เข้มข้นแตกต่างกัน อาจส่งผลกระทบต่อความลึกของชั้น n-Si และ n^{++} -Si ได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีแนวคิดการผลิตเซลล์ด้วยวิธี SOD ที่ใช้แหล่งสารเจือเข้มข้นสูงเพียงอัตราส่วนค่าเดียวคือ TEOS : H_2PO_3 = 3:1 ร่วมกับเทคนิค Etching back ด้วยสารละลายเคมี และเทคนิคการประทับลาย (Stamping technique) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.3 การวัดค่าประสิทธิภาพของ SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย

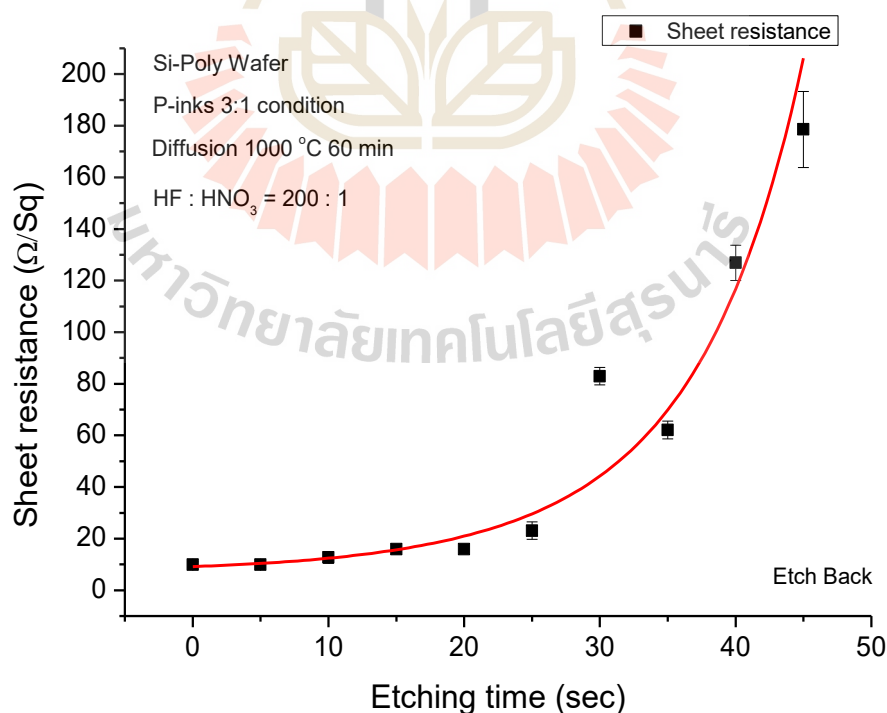
Condition	$\rho_{\square}$ (Ω/Sq)	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF	$\eta(\%)$	Efficiency Gain (%)
Ref.	95.17	0.49	26.32	0.55	7.07	-
SE1	55.97	0.49	26.43	0.56	7.27	0.2
SE2	74.32	0.50	25.77	0.63	8.11	1.04
SE3	95.17	0.49	24.16	0.64	7.59	0.52
SE4	130.52	0.52	27.94	0.59	8.54	1.47
SE5	155.68	0.50	26.58	0.58	7.71	0.64

4.3.3 การสร้าง SE cell ด้วยเทคนิค Etching back และการประทับลาย (Stamping Technique)

วิธี Etching back เป็นกระบวนการสกัดผิวซิลิคอนที่ชั้นแพร่สารเจือ เพื่อลดระดับค่าความเข้มข้นของสารเจือลง เนื่องจากความเข้มข้นสารเจือในชั้น n-Si เปลี่ยนแปลงตามระยะ

ความลึกของการแพร่ดังรูปกราฟที่ 3.16 ของบทที่ 3 ในการศึกษาได้ทำการปรับเปลี่ยนค่า ρ_{Sheet} ของ n^{++} -Si ให้ลดลงหลังจากการแพร่สารเจือด้วย SOD จากสารละลาย PSG เข้มข้นสูง ในเงื่อนไข TEOS : H_3PO_4 = 3:1 ซึ่งทำให้ได้ค่า ρ_{Sheet} มีค่าเท่ากับ 9.97 Ω/Sq จากนั้นนำเข้าสู่ขั้นตอนการ Etching back เพื่อสกัดชั้น n^{++} -Si ซึ่งเป็นวิธีการสกัดด้วยสารละลายเคมี ที่มีอัตราส่วนสารเคมี HF : HNO_3 = 200 : 1 และได้ความคุมเวลาการสกัดตั้งแต่ 0 ถึง 50 วินาที แสดงขั้นตอนการ Etching Back ไว้ในหัวข้อที่ 3.4 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาของการ Etching Back หรือเวลาสกัดชั้น n^{++} -Si เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n^{++} -Si เพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเลขยกกำลัง จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่าค่า ρ_{Sheet} ที่ใช้ผลิต SE cell ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 120 Ω/Sq

ดังนั้นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดชั้น n^{++} -Si มีค่าอยู่ในช่วง 35 ถึง 40 วินาที ซึ่งทำให้ได้ค่า ρ_{Sheet} มีค่าเท่ากับ 70 ถึง 120 Ω/Sq แสดงไว้ดังรูปที่ 4.15 จากรูปกราฟยังพบอีกว่าในช่วงเวลาการสกัดน้อยกว่า 25 วินาที เกิดค่า ρ_{Sheet} มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ควบคุมค่าได้ดี แต่เมื่อเวลาการสกัดมากกว่า 25 วินาที พบว่าค่า ρ_{Sheet} เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ความคุมค่า ρ_{Sheet} ได้ยาก เนื่องจากผลของขอบเขตเกรนผลึก (Grain boundary) ของแผ่นฐาน Poly-Si

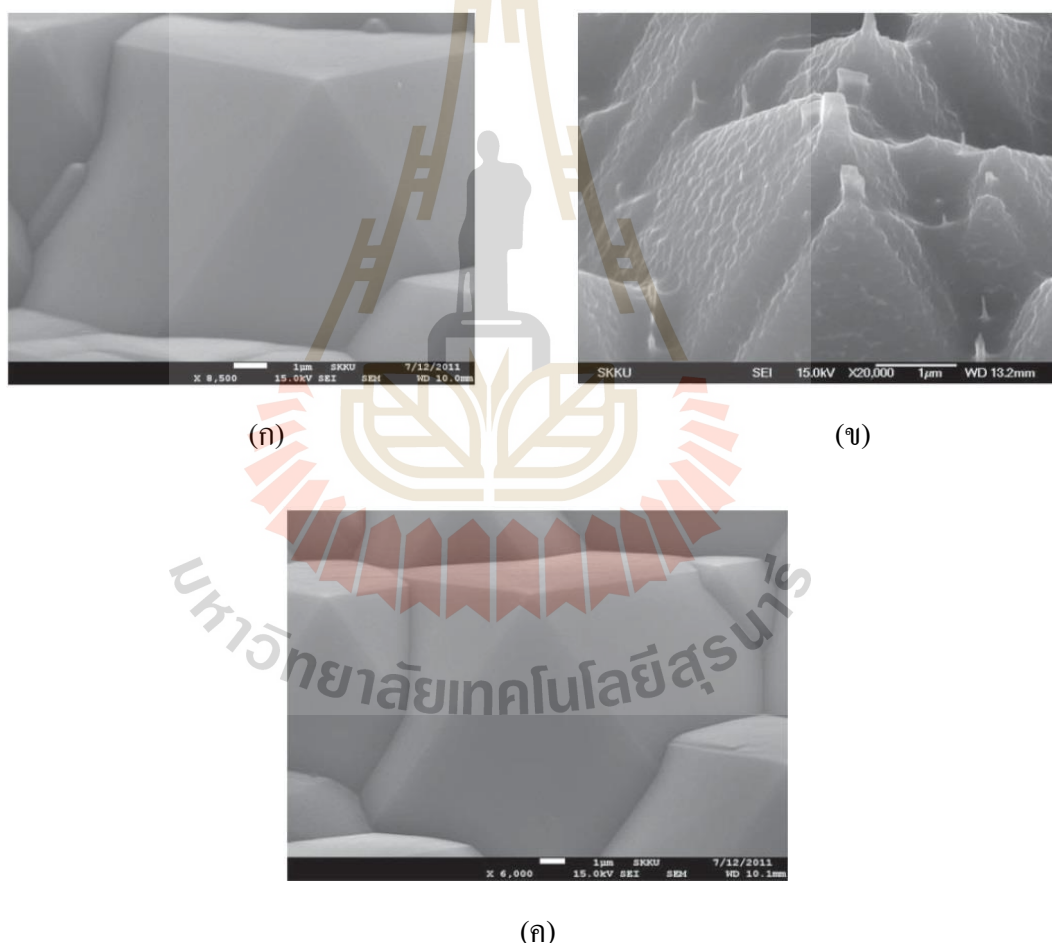


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ρ_{Sheet} กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ Etching back

จากการศึกษาพบว่าวิธีการกัดชั้น n^+-Si มีอยู่ 2 วิธีคือ

1. การกัดด้วยสารละลายเคมี (Wet etching) ซึ่งวิธีนี้ไม่ส่งผลเสียต่อโครงสร้างผิวด้านรับแสงของเซลล์ และโครงสร้างไม่ถูกทำลาย แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก)
2. การกัดด้วยไอออน หรือ RIE (Reactive-ion etching) พบว่าวิธี RIE ส่งผลเสียต่อโครงสร้างเซลล์ โดยผิวที่ถูกกัดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และทำลายโครงสร้างของชั้นรับแสง แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข)

จากการกัดทั้ง 2 วิธี เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ยังไม่ผ่านการกัด แสดงดังรูป 4.16 (ก) พบว่าวิธีที่ 1 การกัดด้วยสารเคมีสามารถรักษาลักษณะทางกายภาพทางโครงสร้างไว้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นเหตุผลให้ผู้วิจัยเลือกการกัดชั้น n^+-Si ด้วยวิธี 1

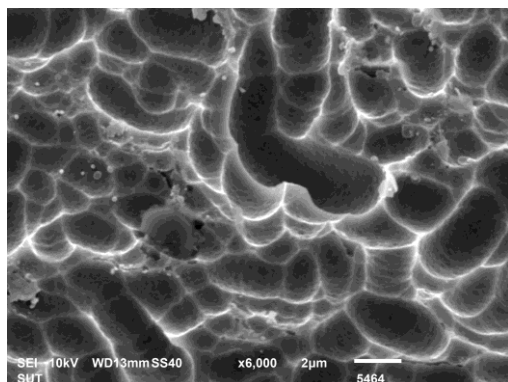


รูปที่ 4.16 โครงสร้างชั้นรับแสงของเซลล์ c-Si (ก) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ยังไม่ถูกกัด (ข) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดด้วยวิธี RIE และ (ค) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกกัดด้วยวิธีการกัดด้วยสารละลายเคมี (Song et al. Nanoscale Research Letters 2012, 7:410)

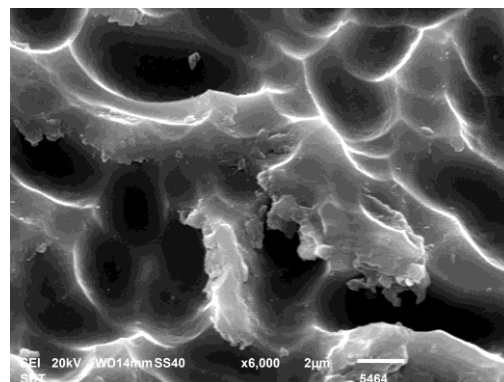
หลังจากขั้นตอนของการสักระชั้น n-Si ผู้ศึกษาได้นำชิ้นงานไปวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (Scanning Electron Microscope (W-SEM)) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6010LV ดังรูปที่ 4.17 โดยที่การทำงานของ SEM มีหลักการทำงานคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ตามเลนส์ที่กำหนด ซึ่งภายในเครื่องมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์อยู่ในช่วง 0-20 kV โดยที่ทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนผิวของชิ้นงาน โดยจะมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่ส่องกราดลำอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ที่พื้นผิวของชิ้นงานเป็นพื้นที่เล็ก ๆ จะทำให้เกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นและในเวลาเดียวกันจะมีตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) คอยตรวจจับสัญญาณแล้วประมวลผลเป็นภาพแสดงบนหน้าจอ ข้อดีของ SEM คือสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1000 เท่า ซึ่งถ้าเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy, OM) จะสามารถถ่ายภาพที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 10-1000 เท่า เท่านั้นซึ่งจะไม่สามารถขยายวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า $0.2\ \mu\text{m}$ ได้



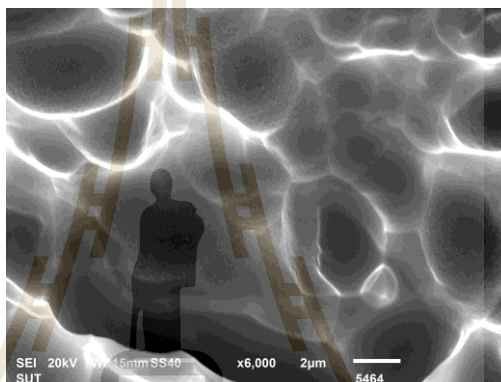
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายเครื่อง Scanning Electron Microscope (W-SEM)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.18 (ก) โครงสร้างชั้นรับแสงแผ่นฐาน Poly-Si (ข) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกสกัดแต่ยังไม่ได้ล้าง RCA1 และ (ค) โครงสร้างชั้นรับแสงที่ถูกสกัดผ่านการล้าง RCA1

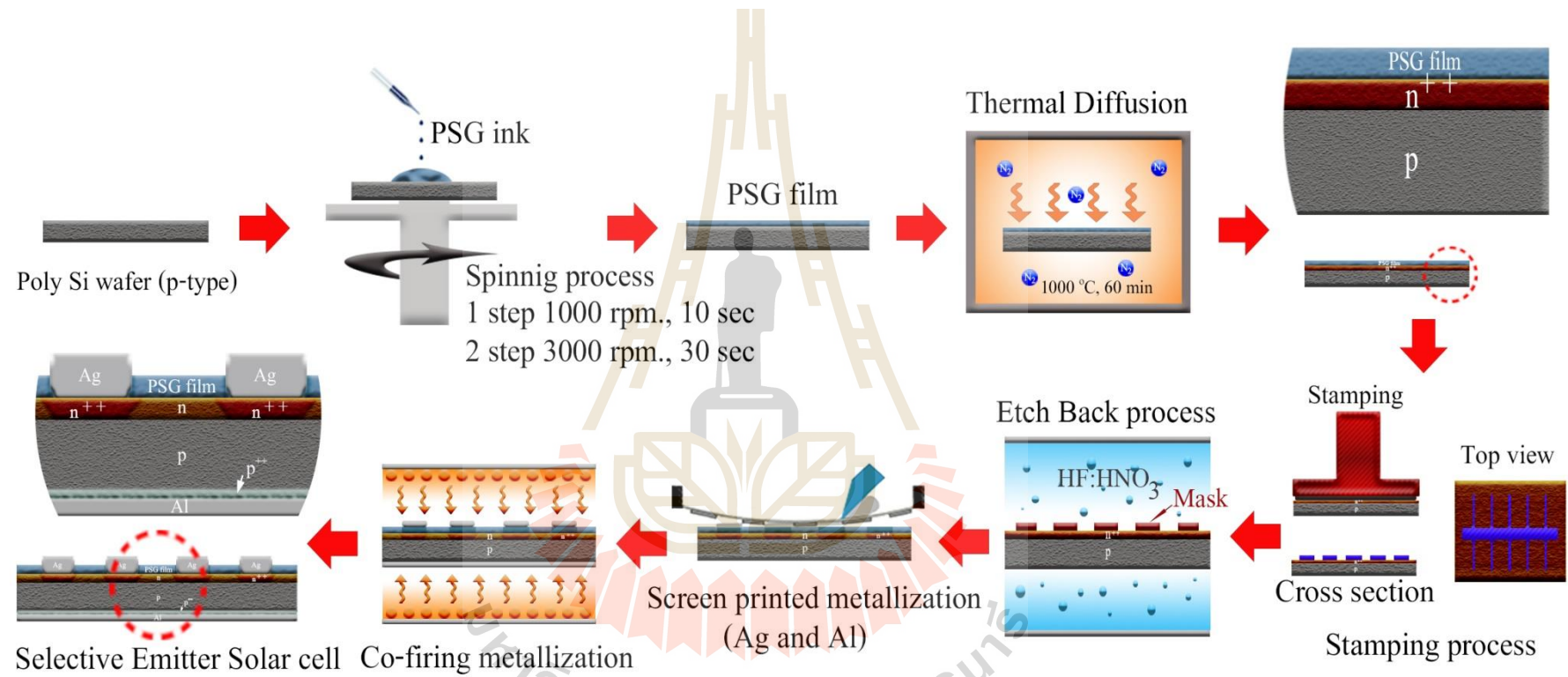
จากรูปที่ 4.18 (ก) แสดงโครงสร้างพื้นผิวของแผ่นฐาน Poly-Si พบว่าที่กำลังขยาย 6000 เท่า ลักษณะของแผ่นฐาน Poly-Si มีความขรุขระ เนื่องจากแผ่นฐาน Poly-Si ถูกสร้างลงด้ายบนพื้นผิวเพื่อลดการสะท้อนแสงกลับของตัววัสดุ ด้วยวิธีการใช้สารเคมีสกัดผิว กระบวนการนี้ได้จากการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด(มหาชน)

จากรูปที่ 4.18 (ข) แสดงโครงสร้างพื้นผิวชั้น n-Si ที่ผ่านการ Etching Back ที่ยังไม่ผ่านการทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 ถูกถ่ายที่กำลังขยาย 6000 เท่า เมื่อนำรอยต่อ p/n-Si ไปผ่านกระบวนการ Etching back พบว่ามีชั้นออกไซด์ (Oxide) เคลือบอยู่ที่บนผิวของชั้น n-Si ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีขณะจุ่มรอยต่อ p/n-Si ลงในสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ Etching back ผลจากการสกัดผิวของชั้น n-Si และชั้นของออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของชั้น n-Si ทำให้ไม่เห็นลักษณะของขรุขระเหมือนรูปที่ 4.18 (ก)

จากรูปที่ 4.18 (ค) แสดงโครงสร้างพื้นผิวชั้น n-Si ที่ผ่านการ Etching Back และได้ผ่านการทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 ถูกถ่ายที่ค่าลงขยาย 6000 เท่า พบว่าชั้นของออกไซด์ได้หลุดออกไป จึงทำให้เห็นภาพลักษณะของโครงสร้างของพื้นผิวของชั้น n-Si ที่แท้จริง พบว่าลักษณะของพื้นผิวนั้นยังคล้ายกับขรุขระอยู่ แต่เพียงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการสกัดผิวของชั้น n-Si ในกระบวนการของ Etching back

จากรูปที่ 4.19 แสดงขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย โดยจะอธิบายรายละเอียดต่อไปนี้

1. นำแผ่นฐานซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาเคลือบสารละลาย PSG ความเข้มข้นสูงด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยง (Spin coating process)
2. หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่ 200 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที จะทำให้ได้ฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานมีคุณภาพดี เพื่อใช้เป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสในการแพร่สำหรับสร้างชั้น n-Si
3. นำไปเข้าเตาอุณหภูมิสูงเพื่อแพร่สารเจือลงบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si ที่มีอุณหภูมิการแพร่เท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการแพร่นาน 60 นาที และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที
4. เมื่อทำการแพร่สารเจือเป็นที่เรียบร้อยแล้วนำชิ้นงานไปกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการแพร่ออกให้หมดด้วยสารละลาย HF5% และ BHF โดยอธิบายการล้างไว้ในบทที่ 3 จะทำให้ได้รอยต่อ p/n-Si ที่ชั้น n-Si ถูกสร้างให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นมีค่าต่ำกว่า $50 \Omega/\text{Sq}$
5. เมื่อได้รอยต่อ p/n-Si แล้วให้นำมาสร้างลวดลายด้วยการประทับลาย เพื่อสร้างหน้ากักป้องกันสกัดของสารละลายที่มีลักษณะเหมือนลวดลายของขั้วไฟฟ้าด้านบน
6. เมื่อสร้างหน้ากักป้องกันแล้ว ให้นำชิ้นงานมาเข้าสู่กระบวนการ Etching back โดยขั้นตอนนี้ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3
7. เมื่อเสร็จจากกระบวนการ Etching back แล้วจะทำให้ได้รอยต่อ p/n-Si โดยที่ชั้น n-Si มี 2 บริเวณ คือบริเวณรับแสง n-Si ที่เกิดจากการกระบวนการ Etching back และชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการแพร่ หรือบริเวณที่ถูกหน้ากักป้องกันไว้
8. นำชิ้นงานไปสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการพิมพ์ลายโลหะ
9. นำเซลล์แสงอาทิตย์ไปผ่านกระบวนการ Fast firing ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส และ 930 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 วินาที
10. ได้ SE cell ที่สร้างขึ้นจากเทคนิคการประทับลาย



รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย (Stamping Technique)

หลังจากได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Etching Back แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าช่วงชีวิตพาหะของชั้น n-Si ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่อง Photoconductance lifetime tester ยี่ห้อ Sinton instrument รุ่น WCT-120 โดยใช้เทคนิค Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ในการวัดค่าช่วงชีวิตพาหะในงานวิจัยนี้ ใช้ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย (Minority carrier density) เท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ โดยแสดงลักษณะของเครื่องไว้ดังรูปที่ 4.20



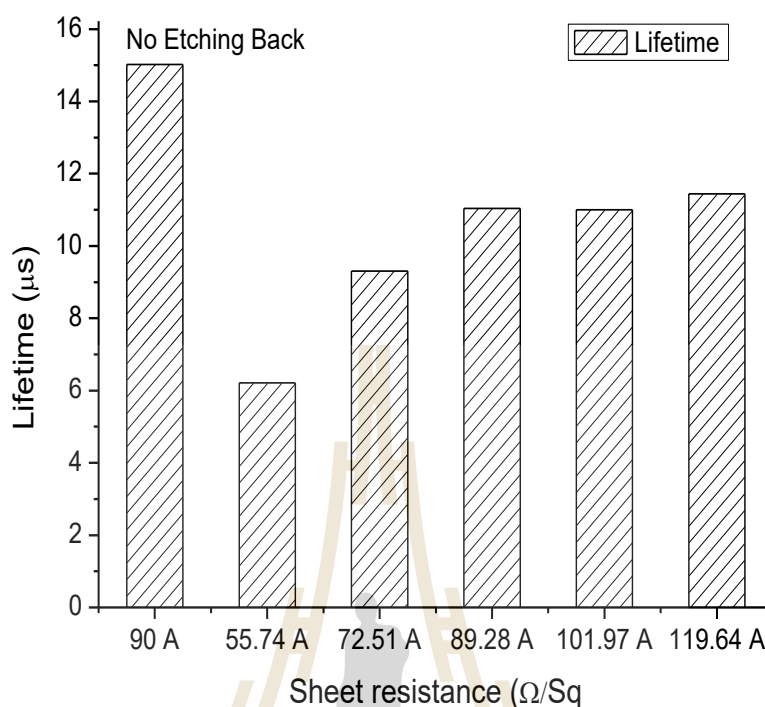
รูปที่ 4.20 เครื่องวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ Sinton รุ่น WCT-120 จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) (<http://www.sintoninstruments.com>)

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะของชั้น n-Si ที่ผ่านกระบวนการ Etching Back

Condition	Structure	n emitter ρ_{Sheet} (Ω/Sq)	Lifetime $\tau_{\text{eff}}(\mu\text{s})$	Surface recombination velocity $S_{\text{eff}}(\text{cm/s})$
PV-ref.	$\text{SiO}_2/\text{n/p}(\text{multi-Si})$	90.00	15.02	6.66
PV-SE1	$\text{SiO}_2/\text{n} \ \& \ \text{n}^{++}/\text{p}(\text{multi-Si})$	55.74	6.21	16.10
PV-SE2	$\text{SiO}_2/\text{n} \ \& \ \text{n}^{++}/\text{p}(\text{multi-Si})$	72.51	9.31	10.74
PV-SE3	$\text{SiO}_2/\text{n} \ \& \ \text{n}^{++}/\text{p}(\text{multi-Si})$	89.28	11.04	9.06
PV-SE4	$\text{SiO}_2/\text{n} \ \& \ \text{n}^{++}/\text{p}(\text{multi-Si})$	101.97	11.00	9.09
PV-SE5	$\text{SiO}_2/\text{n} \ \& \ \text{n}^{++}/\text{p}(\text{multi-Si})$	119.64	11.44	8.74

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และ อัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะของชั้น n-Si ที่ผ่านกระบวนการ Etching back โดยที่ เจื่อนไซ PV-ref. คือโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยรอยต่อ p/n-Si และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เคลือบอยู่ทั้งด้านหน้า และด้านหลังของรอยต่อ p/n-Si และเจื่อนไซ PV-SE1 ถึง PV-SE5 คือ โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยรอยต่อ p/n-Si แต่ชั้น n-Si จะมี 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณรับแสง (n-Si) และบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (n⁺⁺-Si) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เคลือบอยู่ทั้งด้านหน้า และ ด้านหลังของรอยต่อ p/n-Si โดยที่การสร้างชั้น SiO₂ สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสร้างชั้น SiO₂ มีค่าเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตาเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และปล่อยก๊าซสออกซิเจน (O₂) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 200 sccm. ซึ่งจากการวัดความหนาของชั้น SiO₂ ด้วยเครื่อง Ellipso meter ชั้น SiO₂ นี้มีความหนาเท่ากับ 56.78 nm และมีค่า n เท่ากับ 2.27 หลังจากเคลือบชั้น SiO₂ แล้วจึงนำชิ้นงานไปวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (τ_{eff}) พบว่าค่า ρ_{Sheet} ที่ค่าเท่ากับ 55.74 Ω/Sq มีค่า τ_{eff} เท่ากับ 6.21 μs ซึ่งต่ำที่สุด เนื่องจากเกิดการรวมตัวใหม่แบบ Auger เพิ่มขึ้น และการเพิ่มของจำนวนแถบกับดักของการรวมตัวใหม่แบบ SRH และเมื่อค่า ρ_{Sheet} เพิ่มขึ้นเป็น 72.51 Ω/Sq พบว่าค่า τ_{eff} เพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.31 μs จากนั้นทำการเพิ่มค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 89.28 Ω/Sq 101.97 Ω/Sq และ 119.64 Ω/Sq พบว่าค่า τ_{eff} มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะแบบ Auger และแบบ SRH ลดลง และได้แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.21

จากรูปที่ 4.21 ยังพบอีกว่าค่า ρ_{Sheet} มีค่าเท่ากับ 90.00 Ω/Sq มีค่า τ_{eff} เท่ากับ 15.02 μs ซึ่งมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเจื่อนไซนี้ไม่ได้ผ่านการ Etching Back จึงไม่มีผลกระทบจากการเกิดจุดบกพร่องที่ผิวของแผ่น Poly-Si มากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Etching back



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าช่วงชีวิตพาหะของชั้น n-Si หลังจากผ่านกระบวนการ Etching back

4.4 เปรียบเทียบราคาประมาณของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างพื้นฐานกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ฟอโตนิก

ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si โครงสร้างพื้นฐานในโรงงานอุตสาหกรรม ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง มีราคาสูงประมาณ 225 ล้านบาท (คู่มือโรงงาน ปี 2548) แสดงตามตารางที่ 4.5 และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาในการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิค Photolithography พบว่ามีราคาสูงกว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพื้นฐานอยู่ประมาณ 8.31% เนื่องจากต้องเพิ่มเทคโนโลยีในการผลิตในขั้นตอนการผลิตโครงสร้าง SE เช่นเทคโนโลยี Photolithography และเทคโนโลยี Laser เป็นต้น ซึ่งมีราคาสูงแสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงหาแนวทางการผลิตโครงสร้าง SE ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ โดยใช้เทคนิค การพิมพ์ลาย และการประทับลาย ซึ่งมีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ เมื่อนำราคาการผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย

มาเปรียบเทียบกับราคาการผลิต SE cell ด้วยเทคนิค Photolithography พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 8.15% และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาการผลิต SE cell ด้วยเทคนิค Laser พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 6.42% และเมื่อนำราคาเครื่องจักรการผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลายมาเปรียบเทียบกับเทคนิค Photolithography พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 4.24% และเมื่อเปรียบเทียบกับราคาการผลิต SE cell ด้วยเทคนิค Laser พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 2.25% แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.5 ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพื้นฐาน

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
PVD, PECVD	ใช้สร้างรอยต่อ p-n Si และชั้นSiN _x	200,000,000
Compressed dry air (CDA)	ใช้อัดอากาศ เพื่อเปิดปิดวาล์ว	200,000
Gas monitoring	ตรวจสอบก๊าซรั่ว	1,200,000
Gas scrubber	กำจัดก๊าซออกจาก PECVD	5,000,000
Gas piping	ระบบท่อต่อระหว่างเครื่อง PECVD และ PVD ถึงเก็บก๊าซกับเครื่องกำจัดก๊าซอันตราย	3,000,000
Chiller	ใช้หล่อเย็นเครื่อง PECVD และ PVD	5,000,000
Bled blaster	ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเครื่อง PECVD และ PVD	150,000
Crane & Hoist	ใช้ยกชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อติดตั้งและบำรุงรักษา	500,000
Screen printing	ใช้ทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและด้านหลัง	10,000,000
รวม		225,050,000

ตารางที่ 4.6 ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิค Photolithography

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
PVD, PECVD	ใช้สร้างรอยต่อ p-n Si และชั้นSiN _x	200,000,000
Compressed dry air (CDA)	ใช้อัดอากาศ เพื่อเปิดปิดวาล์ว	200,000
Gas monitoring	ตรวจสอบก๊าซรั่ว	1,200,000
Gas scrubber	กำจัดก๊าซออกจาก PECVD	5,000,000

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
Gas piping	ระบบท่อต่อระหว่างเครื่อง PECVD และ PVD ถึงเก็บก๊าซกับเครื่องกำจัดก๊าซอันตราย	3,000,000
Chiller	ใช้หล่อเย็นเครื่อง PECVD และ PVD	5,000,000
Bled blaster	ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเครื่อง PECVD และ PVD	150,000
Crane & Hoist	ใช้ยกชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อติดตั้งและบำรุงรักษา	500,000
Screen printing	ใช้ทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและด้านหลัง	10,000,000
Spin coater	ใช้เคลือบฟิล์มสารไวแสง	400,000
Photolithography machine	เครื่องสร้างลวดลาย	20,000,000
รวม		245,450,000

ตารางที่ 4.7 ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการใช้ Laser

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
PVD, PECVD	ใช้สร้างรอยต่อ p-n Si และชั้น SiN_x	200,000,000
Compressed dry air (CDA)	ใช้อัดอากาศเพื่อเปิดปิดวาล์ว	200,000
Gas monitoring	ตรวจสอบก๊าซรั่ว	1,200,000
Gas scrubber	กำจัดก๊าซออกจาก PECVD	5,000,000
Gas piping	ระบบท่อต่อระหว่างเครื่อง PECVD และ PVD ถึงเก็บก๊าซกับเครื่องกำจัดก๊าซอันตราย	3,000,000
Chiller	ใช้หล่อเย็นเครื่อง PECVD และ PVD	5,000,000
Bled blaster	ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเครื่อง PECVD และ PVD	150,000
Crane & Hoist	ใช้ยกชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อติดตั้งและบำรุงรักษา	500,000
Screen printing	ใช้ทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและด้านหลัง	10,000,000
Spin coater	ใช้เคลือบฟิล์มสารไวแสง	400,000
Laser machine	เครื่องสร้างลวดลาย	15,000,000
รวม		240,450,000

ตารางที่ 4.8 ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
PVD, PECVD	p-n Si และ SiN _x	200,000,000
Compressed dry air (CDA)	ใช้อัดอากาศ เพื่อเปิดปิดวาล์ว	200,000
Gas monitoring	ตรวจสอบก๊าซรั่ว	1,200,000
Gas scrubber	กำจัดก๊าซออกจาก PECVD	5,000,000
Gas piping	ระบบท่อต่อระหว่างเครื่อง PECVD และ PVD ถึงเก็บก๊าซกับเครื่องกำจัดก๊าซอันตราย	3,000,000
Chiller	ใช้หล่อเย็นเครื่อง PECVD และ PVD	5,000,000
Bled blaster	ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเครื่อง PECVD และ PVD	150,000
Crane & Hoist	ใช้ยกชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อติดตั้งและบำรุงรักษา	500,000
Screen printing	ใช้สร้างบริเวณ SE และขั้วไฟฟ้า	10,000,000
Spin coater	ใช้เคลือบฟิล์ม PSG	400,000
รวม		225,450,000

ตารางที่ 4.9 ประมาณราคาเครื่องจักรสำหรับผลิต SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
PVD, PECVD	p-n Si และ SiN _x	200,000,000
Compressed dry air (CDA)	ใช้อัดอากาศ เพื่อเปิดปิดวาล์ว	200,000
Gas monitoring	ตรวจสอบก๊าซรั่ว	1,200,000
Gas scrubber	กำจัดก๊าซออกจาก PECVD	5,000,000
Gas piping	ระบบท่อต่อระหว่างเครื่อง PECVD และ PVD ถึงเก็บก๊าซกับเครื่องกำจัดก๊าซอันตราย	3,000,000
Chiller	ใช้หล่อเย็นเครื่อง PECVD และ PVD	5,000,000
Bled blaster	ใช้ทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเครื่อง PECVD และ PVD	150,000
Crane & Hoist	ใช้ยกชิ้นส่วนเครื่องจักร เพื่อติดตั้งและบำรุงรักษา	500,000

รายการเครื่องจักร	การใช้งาน	ราคา(บาท)
Stamping	ใช้สร้างหน้ากาก	10,000,000
Screen printing	ใช้ทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและด้านหลัง	10,000,000
รวม		235,050,000

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบราคาเครื่องจักรสำหรับการผลิต SE cell

เทคนิคที่ใช้	ราคา (ล้านบาท)	เปรียบเทียบกับ Photolithography (%)	เปรียบเทียบกับ Laser (%)
Photolithography	245,450,000	-	-2.08
Laser	240,450,000	2.04	-
Screen printing	225,450,000	8.15	6.24
Stamping	235,050,000	4.24	2.25

4.5 สรุป

จากการสังเคราะห์แหล่งสารเจือจางในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสร้างชั้น n-Si พบว่าในเงื่อนไขที่ใช้ PSG ink ในสัดส่วน 9:1 ($P = 0.30 \text{ \%at.}$) ที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 60 นาที ให้ค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ $237.93 \text{ }\Omega/\text{Sq}$ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะตอมฟอสฟอรัส พบว่าผลของ ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si จะลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น และจะคงที่เมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเกิดค่า Solid Solubility และจากการวัดค่าประสิทธิภาพพบว่า การสร้างชั้นรับแสง n-Si ซึ่งผลิตด้วยวิธี SOD ในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพการแปลงงานประมาณ 9.34% และ FF ที่สูงประมาณ 0.61 ให้เงื่อนไขการผลิต SOD6 ($\text{TEOS:H}_3\text{PO}_4 = 7.0 : 1$) และใช้ชั้น PSG เป็นชั้น ARC ให้กับเซลล์ อย่างไรก็ตามการแพร่สารเจือด้วยสารละลาย PSG หรือเทคนิค SOD นี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความสม่ำเสมอของชั้น n-Si ที่ได้แม้ว่ามีก๊าซไนโตรเจนไหลในระบบ แต่ระบบเตาการแพร่ในห้องปฏิบัติการเป็นระบบเปิดกับอากาศปกติ ทำให้ชั้น n-Si ที่เกิดขึ้นอาจไม่มีความสม่ำเสมอดีเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามวิธี SOD ยังจัดว่ามีข้อดีสำหรับเทคนิคต้นทุนต่ำ

จากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE แบบต่าง ๆ ด้วยสารเจือ PSG ink ในหัวข้อนี้พบว่า การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE ด้วยเทคนิค Photolithography ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 1.74% เมื่อเทียบกับเซลล์โครงสร้างมาตรฐาน ขณะที่ SE cell ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลายให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 1.47% เทียบกับเซลล์อ้างอิง และจากการสร้างโครงสร้าง SE ด้วยเทคนิค Etching back ทำให้ค่า ρ_{Sheet} สูงขึ้นเท่ากับ

119.64 Ω/Sq และมีค่าช่วงชีวิตของพาหะสูงขึ้นเท่ากับ 11.44 μs ซึ่งเพิ่มขึ้นจากค่า ρ_{Sheet} ที่มีค่าต่ำเท่ากับ 55.74 Ω/Sq และมีค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ต่ำเท่ากับ 6.21 μs เนื่องจากผลของ Dead layer

เมื่อเปรียบเทียบราคาเครื่องจักรในการผลิต SE พบว่าเทคนิคการพิมพ์ลาย และเทคนิคการประทับลายสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 8.15% ถึง 4.24% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค Photolithography ดังนั้นด้วยวิธีการผลิต SE cell แบบเทคนิคการพิมพ์ลาย และเทคนิคการประทับลาย จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานวิจัย

1. สามารถผลิต PSG ink ได้ และมีค่า ρ_{Sheet} ระหว่าง 22.66 Ω/Sq ถึง 237.93 Ω/Sq และเปอร์เซ็นต์อะตอมฟอสฟอรัสของสารเจืออยู่ในช่วง 0.30 %at. ถึง 0.86 %at.
2. ผลิตเซลล์ด้วยวิธี SOD ควมคุม n-Si รับแสงได้ มีค่า ρ_{Sheet} ตั้งแต่ 55.97 Ω/Sq ถึง 155.68 Ω/Sq และได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานภายใต้ ρ_{Sheet} ของ n-Si ที่ระดับ 121.46 Ω/Sq สูงสุดที่ 9.34%
3. ผลิตเซลล์ด้วยเทคนิค Photolithography ด้วยชั้น n-Si จากอุตสาหกรรม โดยที่ค่า ρ_{Sheet} ของ n-Si มีค่าเท่ากับ 90 Ω/Sq และที่ n^{++} -Si มีค่าเท่ากับ 22.66 Ω/Sq จากวิธีเปิดช่องและพิมพ์ลาย PSG ink เข้มข้นสูงระดับ 0.86 %at. ได้ผลประสิทธิภาพเท่ากับ 11.52% และ FF มีค่าเท่ากับ 0.56 ซึ่งประสิทธิภาพสูงขึ้นเท่ากับ 1.74% เมื่อเทียบกับโครงสร้างพื้นฐาน
4. สามารถผลิต SE cell ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงที่บริเวณ n-Si รับแสงมีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 130.52 Ω/Sq และวิธีพิมพ์ลายที่บริเวณ n^{++} -Si มีค่า ρ_{Sheet} เท่ากับ 22.66 Ω/Sq ได้ผลประสิทธิภาพเท่ากับ 8.54% ซึ่งต่ำกว่าแบบ Photolithography เนื่องจากชั้น n-Si ผลิตในห้องปฏิบัติการทั้งหมด ซึ่งไม่ได้ควบคุมความดันในระบบการแพร่
5. สามารถปรับเปลี่ยนค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si รับแสงด้วยเทคนิค Etching back ของสารละลายเคมีเพื่อสกัดชั้น n^{++} -Si ที่ผลิตทั้งแผ่นให้เกิดการสกัดผิวบางบริเวณและส่งผลให้ ρ_{Sheet} เพิ่มขึ้น เพื่อสร้างเป็นบริเวณ n-Si รับแสง ผลที่ได้พบว่าค่า ρ_{Sheet} สูงขึ้นจาก 55.74 Ω/Sq เป็น 119.64 Ω/Sq เมื่อเงื่อนไขดังกล่าวไปผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะให้ค่าช่วงชีวิตของพาหะสูงขึ้นเท่ากับ 11.44 μs เมื่อค่า ρ_{Sheet} มากขึ้นที่ระดับ 119.64 Ω/Sq

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing technique)

ในงานวิจัยนี้ใช้ไหมพิมพ์ลายเบอร์ 200 mesh ซึ่งมีขนาดของรูไหมเท่ากับ 74 μm จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าไหมพิมพ์ลายเบอร์ 200 นี้มีขนาดรูไหมเล็กเกินไป ซึ่งจะทำให้รู

ไหมต้นได้ง่ายจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ในครั้งควรใช้ขนาดที่เหมาะสม คือ ไม่เล็กและไม่ใหญ่จนเกินไป

2. การสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

สิ่งสำคัญของสร้างขั้วไฟฟ้าคือความสะอาดก่อนพิมพ์ลายควรทำความสะอาดแผ่นฐานด้วยวิธี RCA1 และตามด้วยจุ่ม HF5% เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันกับอากาศตามธรรมชาติ และลวดลายที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านบนจะต้องไม่ขาดออกจากกัน ขั้วไฟฟ้าด้านหลังต้องยึดติดดีไม่หลุดร่อน เพราะจะส่งผลถึงค่าทางไฟฟ้าให้ออกมาไม่ดีได้ และการให้ความร้อนแก่ขั้วไฟฟ้านั้นควรให้ที่ความร้อนสูงและมีความรวดเร็ว หรือที่เรียกว่า Fast Firing

3. SE cell (Selective emitter solar cell)

เนื่องจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชั้นเอ็น 2 บริเวณ ซึ่งบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็ก จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าให้ตรงกับชั้นเอ็นบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า ดังนั้นควรมีวิธีการวางแนว (Alignment) ที่ดี หรือใช้การควบคุมการวางแนวด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีการใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

- Aberle, A.G.(2000). **Surface Passivation of Crystalline Silicon Solar Cells: A Review.** PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2000; 8: 473-487.
- Antoniadis, H., Jiang, F., Shan, W., and Liu, Y. (2010). **All Screen Printed Mass Produced Silicon Ink Selective Emitter Solar Cells.** IEEE.
- Buckley, A. M., and Greenblatt, M. J.(1994). **Sol-Gel Preparation of Silica Gels.** *Journal of Chemical Education* Ed. 1994, 71(7), 599.
- Brinker, C. J., and Scherer, G. W.. **Sol-Gel SCIENCE (The Physical and Chemistry of Sol-Gel).** Processing. ACADEMIC PRESS, INC. Printed in the United States of America 06 07 08 / 16 15 14.
- Choi, J., Song, K., Balaji, N., Park, C., Ju, M., Ahn, S., Lee, H., and Yi, J.(2013). **A Simulation Study on the Shallow Emitter Sheet Resistance for Selective Emitter Crystalline Silicon Solar Cell with Screen Printed Etched Back Process.** *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* Vol. 10, 1767-1771.
- Dastgheib-Shirazi, A., Haverkamp, H., Raabe, B., Book, F., and Hahn, G.(2008). **Selective Emitter for Industrial Solar Cell Production: A Wet Chemical Approach Using A Single Side Diffusion.** Process. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Dullweber, T., Hannebauer, H., Dorn, S., Schimanke, S., Merkle, A., Hampe, C., and Brendel, R.(2016). **Emitter Saturation current densities of $22\text{fA}/\text{cm}^2$ applied to industrial PERC solar cells approaching 22% conversion efficiency.** Prog. Photovolt: Res. Appl. 2017; 25:509-514.
- Fangsuwannarak, T., Phiwpah, N., Mangkornkaew, A., and Sopitpan, S.(2014). **Preparation of Different Phosphorus Concentration for N^+ Selective Emitter Solar Cell by Spin on Doping.** GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Proceedings.
- Green, M. A.. **Solar cells Operating Principles, Technology and System Applications.** Printed by Bridge Printery Pty Ltd, 29-35 Dunning Avenue, Rosebery, NSW 2018.

- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., and Dunlop, E. D. (2015). **Solar cell efficiency tables (Version 45)**. Prog. Photovolt : Res. Appl. 2015 ; 23 : 1-9
- Jeong, K. T., Kang, M. G., and Song, H.(2014). **Selective-emitter Crystalline Silicon Solar Cell Using Phosphorus Paste**. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 65, No. 9, November 2014, pp. 1457-1461.
- Jourdan, J., Popescu, L.M., Halm, A., and Kopecek, R.. **Selective emitter solar cells on p-type grade silicon wafers**. International Solar Energy Research Center Konstanz-ISC-Konstanz, Rudolf-Diesel-Str. 15, D-78467 Konstanz, Germany.
- Jäger, U., Thaidigsmann, B., Okanovic, M., and Preu, R. (2011). **Quantum Efficiency Analysis of Highly Doped Areas for Selective Emitter Solar Cells**. Energy Procedia 8 (2011) 193-199
- Kim, L., Kim, D., Kim, D., and Kang, Y.(2014). **Laser etch back process to fabricate highly efficient selective emitter c-Si solar cells**. Solar Energy 109 (2014) 105-110.
- Lee, E., Cho, K., Oh, D., Shim, J., Lee, H., Choi, J., Kim, J., Shin, J., Lee, S., and Lee, H.(2012). **Exceeding 19% efficient 6 inch screen printed crystalline silicon solar cells with selective emitter**. Renewable Energy 42 (2012) 95-98.
- Lin, D., Abbott, M., Lu, P.H., Xiao, B., Hallam, B., Tjahjono, B., and Wenham, S.(2014). **Incorporation of deep laser doping to form the rear localized back surface field in high efficiency solar cells**. Solar Energy Materials & Solar cell 130 (2014) 83-90.
- Röder, T.C., Eisele, S. J., Grabitz, P., Wagner, C., Kulushich, G., Köhler, J. R., and Werner, J. H.(2010). **Add-on Laser Tailored Selective Emitter Solar Cells**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications Prog. Photovolt: Res. Addl. 2010; 18:505-510.
- Rudolph, D., Peter, K., Meijer, A., Doll, O., and Köhler, I.. **Etch back selective emitter process with single POCl₃ diffusion**. International Solar Energy Research Center Konstanz-ISC-Konstanz, Rudolf-Diesel-Str. 15, D-78467 Konstanz, Germany.
- Song, K., Kim, B., Lee, H., Lee, Y., Pack, C., Balaji, N., Ju, M., Choi, J., and Yi, J.(2012). **Selective emitter using a screen printed etch barrier in crystalline silicon solar cell**. Song et al. Nanoscale Research Letters.

- Tang, Y., Wang, G., Hu, Z., Qin, X., Du, G., and Shi, W.(2011). **Preparation of n^+ emitter on p-type Silicon wafer using the Spin-On Doping method.** Materials Science in Semiconductor Processing, doi:10.1016/j.mssp.2011.11.003.
- Zhao, J., Wang, A., and Green, M. A.(1999). **24.5% Efficiency Silicon PERT Cells on MCZ Substrates and 24.7% Efficiency PERL Cell on FZ Substrates.** PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS. Prog. Photovolt: Res. Appl. 7, 471-474.
- Zhong, S., Shen, W., Liu, F., and Li, X.(2013). **Mass production of high efficiency selective emitter crystalline silicon solar cells employing phosphorus ink technology.** Solar Energy Materials & Solar Cells 177 (2013) 483-488.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular emblem with a crown on top. The entire logo is rendered in a light gray color.

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลาย PSG inks

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลาย PSG inks

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลาย PSG inks แสดงรายละเอียดไว้ดังนี้ ทั้งนี้จะแสดงวิธีการคำนวณโดยใช้เงื่อนไขของ TEOS : $\text{H}_3\text{PO}_4 = 3:1$ เป็นตัวอย่างการคำนวณอย่างละเอียด อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นในการผลิตสารละลาย PSG inks ดังตารางต่อไปนี้

ตารางภาคผนวก ก1 อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นสำหรับการผลิตสารละลาย PSG inks เงื่อนไข 3:1 โดยปริมาตร

TEOS : $\text{H}_3\text{PO}_4 = 3:1$			
TEOS	H_2O	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	H_3PO_4
5 ml	10 ml	1.5 ml	1.67 ml

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นมีค่าดังต่อไปนี้

$$MW \text{ ของ TEOS} = 208.33 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$MW \text{ ของ } \text{H}_2\text{O} = 18.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$MW \text{ ของ } \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 46.07 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$MW \text{ ของ } \text{H}_3\text{PO}_4 = 98.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

ค่าความหนาแน่น (D) ของสารละลายของสารตั้งต้นมีค่าดังต่อไปนี้

$$D \text{ ของ TEOS} = 0.93 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$D \text{ ของ } \text{H}_2\text{O} = 1.00 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$D \text{ ของ } \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 0.79 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$D \text{ ของ } \text{H}_3\text{PO}_4 = 1.69 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

➤ วิธีการคำนวณน้ำหนักหรือมวลของสารละลาย (m) มีหน่วยเป็น g

จากสูตร

$$D = \frac{m}{v}$$

ดังนั้น

$$m = D \times v$$

โดยที่ D คือความหนาแน่นของสารละลาย ($\frac{g}{ml}$)

m คือมวลของสารละลาย (g)

v คือปริมาตรของสารละลาย (ml)

ในการคำนวณนี้ใช้ TEOS เป็นตัวอย่างแสดงการคำนวณหามวลของสารละลายจะได้

$$m_{TEOS} = 0.93 \frac{g}{ml} \times 5ml$$

$$m_{TEOS} = 4.65g$$

ดังนั้นมวลของสารละลายตั้งต้นมีค่าดังต่อไปนี้

$$m_{TEOS} = 4.65g$$

$$m_{H_2O} = 10g$$

$$m_{C_2H_5OH} = 1.19g$$

$$m_{H_3PO_4} = 2.82g$$

➤ วิธีการคำนวณหาจำนวนโมลของสารละลายตั้งต้น

จากสูตร

$$mol = \frac{m}{MW}$$

โดยที่ mol คือจำนวน โมลของสารละลาย (mol)

m คือมวลของสารละลาย (g)

MW คือมวลโมเลกุลของสารละลาย ($\frac{g}{mol}$)

ในการคำนวณนี้ใช้ H_3PO_4 เป็นตัวอย่างแสดงการคำนวณหาจำนวนโมลของสารละลาย เนื่องจากสารละลาย H_3PO_4 มีความเข้มข้นของเนื้อสารอยู่ 85 % ดังนั้นในสารละลาย H_3PO_4 100g จะมีเนื้อสารจริงอยู่ 85g จะทำให้มีน้ำอยู่ $100\text{g} - 85\text{g} = 15\text{g}$ ดังนั้นจำนวนมวลของ H_3PO_4 จะได้เท่ากับ

$$m_{\text{H}_3\text{PO}_4(85\%)} = \frac{2.82\text{g} \times 85\text{g}}{100\text{g}}$$

$$m_{\text{H}_3\text{PO}_4(85\%)} = 2.40\text{g}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของ H_3PO_4 จะได้เท่ากับ

$$\text{mol}_{\text{H}_3\text{PO}_4} = \frac{2.40\text{g}}{98.00\text{g/mol}}$$

$$\text{mol}_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 0.0245\text{mol}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของสารละลายตั้งต้นทั้งหมดมีค่าดังนี้

$$\text{mol}_{\text{TEOS}} = 0.0224\text{mol}$$

$$\text{mol}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 0.0258\text{mol}$$

$$\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} = 0.5556\text{mol}$$

$$\text{mol}_{\text{H}_3\text{PO}_4} = 0.0245\text{mol}$$

เนื่องจากเลขอะตอมของสารเจือมีมากกว่า 1 ดังนั้นเลขอะตอมของสารตั้งต้นจึงเขียนลงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางภาคผนวก ก2 แสดงเลขอะตอมของสารละลายตั้งต้น

ชื่อสารละลาย	สูตรทางเคมี	เลขอะตอมของธาตุในสารละลายตั้งต้น				
		C	H	O	Si	P
TEOS	$\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$	8	20	4	1	0
EtOH	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	2	6	1	0	0
Water	H_2O	0	2	1	0	0
Phosphoric	H_3PO_4	0	3	4	0	1

ดังนั้นเลขอะตอมที่แท้จริงของสารละลายตั้งต้นที่ใช้ผลิตสารละลาย PSG inks สามารถหาได้จากจำนวนโมลของสารละลายคูณกับเลขอะตอม โดยยกตัวอย่างการคำนวณของสารละลาย TEOS ดังต่อไปนี้

จากตารางภาคผนวก ก2 จะได้เลขอะตอมของสารละลาย TEOS และจำนวนโมลของ TEOS เท่ากับ 0.0224 mol ดังนั้นเลขอะตอมที่แท้จริงของ TEOS เท่ากับ

$$C \times \text{mol}_{\text{TEOS}} = 8 \times 0.0224 \text{ mol} = 0.1788 \text{ at.}$$

$$H \times \text{mol}_{\text{TEOS}} = 20 \times 0.0224 \text{ mol} = 0.4471 \text{ at.}$$

$$O \times \text{mol}_{\text{TEOS}} = 4 \times 0.0224 \text{ mol} = 0.0894 \text{ at.}$$

$$Si \times \text{mol}_{\text{TEOS}} = 1 \times 0.0224 \text{ mol} = 0.0224 \text{ at.}$$

จะได้ค่าอะตอมที่แท้จริงของสารละลายตั้งต้นดังตารางภาคผนวก ก3 ดังนี้

ตารางภาคผนวก ก2 ค่าอะตอมที่แท้จริงของสารละลายตั้งต้น

ชื่อสารละลาย	สูตรทางเคมี	เลขอะตอมที่แท้จริงของธาตุในสารละลายตั้งต้น				
		C (at.)	H (at.)	O (at.)	Si (at.)	P (at.)
TEOS	$\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$	0.1788	0.4471	0.0894	0.0224	0.0000
EtOH	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0.0515	0.1546	0.0258	0.0000	0.0000
Water	H_2O	0.0000	1.1111	0.5556	0.0000	0.0000
Phosphoric	H_3PO_4	0.0000	0.0440	0.0586	0.0000	0.0147
รวม		0.2303	1.7568	0.7294	0.0224	0.0245
รวมทั้งหมด		2.8321				

ดังกล่าวเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสใน TEOS: H_3PO_4 = 3:1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{Atom of P} &= \frac{P(\text{at.})}{\text{Total}(\text{Atoms})} \times 100\% \\ &= \frac{0.0245}{2.8321} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\% \text{Atom of P} = 0.8650\%$$

โดยที่

$P(\text{at.})$ จำนวนอะตอมของฟอสฟอรัสที่เติมลงในสารละลาย PSG ink
 $\text{Total}(\text{Atoms})$ จำนวนอะตอมของสารละลายทั้งหมดใน PSG ink

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณหาความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย PSG inks

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย PSG inks

ตารางภาคผนวก ข1 ปริมาณของสารละลายตั้งต้นที่ใช้เตรียมสารละลาย PSG inks ของเจ็อนไซ

TEOS : H₃PO₄ = 3:1 หรือ 0.5338 %at.

เจ็อนไซ (TEOS : H ₃ PO ₄)	H ₂ O (ml)	TEOS (ml)	C ₂ H ₅ OH (ml)	H ₃ PO ₄ (ml)	ปริมาตรสุทธิ (ml)
3:1	10.00	5.00	1.50	1.67	18.17

จากจำนวนโมลของฟอสฟอรัสเจ็อนไซ 3:1 ในภาคผนวก ก มีค่าเท่ากับ 0.0245 mol

ดังนั้น ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสหาได้จาก

$$N = mol \times 6.02 \times 10^{23} \frac{atom}{mol}$$

$$N = 0.0245 mol \times 6.02 \times 10^{23} \frac{atom}{mol}$$

$$N = 14.75 \times 10^{21} atom$$

โดยที่ N คือค่าความหนาแน่นของฟอสฟอรัส (atom)

$$6.02 \times 10^{23} \frac{atom}{mol} \text{ คือค่าของ Avogadro's number}$$

mol คือจำนวนโมลของฟอสฟอรัส (mol)

จากปริมาตรสุทธิของสารละลายเจ็อนไซ 3:1 ดังนั้นค่าความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย ปริมาตร 18.17 ml หรือ 18.17 cm³ จะได้

$$N_{Phosphorus} = \frac{14.75 \times 10^{21} atom}{18.17 cm^3}$$

$$N_{Phosphorus} = 8.12 \times 10^{20} \frac{atom}{cm^3}$$



ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณหาความลึกของชั้น n ด้วยวิธีของ Fick's first law และ
Gaussian Distribution

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาความลึกของชั้น n ด้วยวิธีของ Fick's first law และ Gaussian Distribution

จากความหนาแน่นของฟอสฟอรัสที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งความหนาแน่นของฟอสฟอรัสจะส่งผลถึงความลึกของชั้น n-Si โดยที่ความลึกของชั้น n นั้นสามารถหาได้ 2 วิธี 1 หาได้จากการวัดโดยตรง และ 2 หาได้จากการคำนวณ ในงานวิจัยนี้หาค่าความลึกของชั้น n ด้วยวิธีการคำนวณได้ดังนี้

วิธีการคำนวณหาความลึกของชั้น n นั้นสามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ 1 ใช้วิธีของ Fick's first law โดยที่วิธีนี้ใช้คำนวณสารเจือที่ใช้ในการแพร่มีแบบไม่จำกัด และ 2 ใช้วิธีของ Gaussian Distribution วิธีนี้ใช้คำนวณสารเจือที่ใช้ในการแพร่มีแบบจำกัด ในการคำนวณในครั้งนี้จะใช้เงื่อนไข TEOS : $H_3PO_4 = 3:1$ เป็นตัวอย่างในการคำนวณ

การคำนวณของชั้น n-Si ด้วยวิธีของ Fick's first law

จากสมการของ Fick's first law

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

โดยที่ N_0 คือความหนาแน่นของสารเจือที่ผิว ($\frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$)

$N(x,t)$ คือความหนาแน่นของสารที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลาในการแพร่ t ใด ๆ ($\frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$)

$x_j = 2z_j\sqrt{Dt}$ คือความลึกของชั้น n (cm) เมื่อ $z_j = z_i$

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) ที่อุณหภูมิการแพร่จำเพาะ ($\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$)

t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่สารเจือ (s)

และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = \operatorname{erfc}.z = 1 - \operatorname{erf}.z \text{ โดยที่ } \operatorname{erfc}.z$$

คือ complementary error function ของ z เมื่อ $z = \frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}$

จากค่า $N_0 = N_{\text{Phosphorus}} = 8.12 \times 10^{20} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$

$$N(x,t) = 1.00 \times 10^{16} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{erfc}.z = \frac{N(x,t)}{N_0}$$

$$\text{erfc}.z = \frac{1.00 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3}{8.12 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3}$$

$$\text{erfc}.z = 1.23 \times 10^{-5}$$

จากค่าของ

$$\text{erfc}.z = 1 - \text{erf}.z$$

$$\text{erf}.z = 1 - \text{erfc}.z$$

$$\text{erf}.z = 1 - 1.23 \times 10^{-5}$$

$$\text{erf}.z = 0.999988$$

จากการเปิดตารางของ function error จะทำให้ได้ค่าของ z_i ดังนี้

จากค่า

$$\text{erf}.z = 0.999988$$

จะได้

$$z_i = 3.10$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าความลึก (x_j) ของชั้น n ได้ดังนี้

จากสมการ

$$x_j = 2z_j \sqrt{Dt}$$

จากค่าของสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) มีค่าเท่ากับ

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right)$$

โดยที่ D_0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ $10.5 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$

E_A คือค่าพลังงานที่ใช้ในการแพร่ (eV)

k คือค่าคงตัวของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $8.62 \times 10^{-5} \frac{eV}{K}$

T คืออุณหภูมิในหน่วย ($^{\circ}K$) และ $T = 273 + t_c$ เมื่อ t_c คืออุณหภูมิในหน่วย ($^{\circ}C$)

ในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิการแพร่สารเจือเท่ากับ $1000^{\circ}C$ เวลาในการแพร่สารเจือเท่ากับ 60 นาที

ดังนั้น

$$D = 10.5 \frac{cm^2}{s} \exp\left(\frac{-3.69eV}{0.1097eV}\right)$$

$$D = 2.59 \times 10^{-14} \frac{cm^2}{s}$$

จากสูตร

$$x_j = 2z_j \sqrt{Dt}$$

$$x_j = 2 \times 3.10 \sqrt{2.59 \times 10^{-14} \frac{cm^2}{s} \times 3600s}$$

$$x_j = 0.60 \mu m$$

ดังนั้นการคำนวณด้วยวิธีของ Fick's first law ค่าความลึกของชั้น n ที่ได้จากการแพร่สารเจือเจือไน 3:1 มีค่าเท่ากับ 0.60 ไมโครเมตร

ตารางภาพผนวก ก1 ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นด้วยวิธีของ Fick's first law

Diffusion temperature = $1000^{\circ}C$ and Diffusion time = 60 min	
Condition	Depth of n layer
TEOS : H_3PO_4	x_j (μm)
9.0 : 1	0.56
8.5 : 1	0.57

ตารางภาคผนวก ค1 ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นด้วยวิธีของ Fick's first law ต่อ

Diffusion temperature = 1000 °C and Diffusion time = 60 min	
Condition TEOS : H ₃ PO ₄	Depth of n layer x _j (μm)
8.0 : 1	0.57
7.5 : 1	0.57
7.3 : 1	0.57
7.0 : 1	0.57
6.5 : 1	0.58
6.0 : 1	0.58
5.0 : 1	0.58
4.0 : 1	0.59
3.0 : 1	0.60

การคำนวณของชั้น n ด้วยวิธีของ Gaussian Distribution

จากสมการ

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)}$$

และ

$$Q(t) = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

โดยที่ $N(x,t)$ คือความหนาแน่นของสารที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลาในการแพร่ t ใด ๆ ($\frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$)

N_0 คือความหนาแน่นของสารเจือที่ผิว ($\frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$)

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) ที่อุณหภูมิการแพร่จำเพาะ ($\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$)

t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่สารเจือ (s)

π คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.14

x_j คือค่าความลึกของชั้น n โดยที่ $x = x_j$

จากค่า

$$N_0 = N_{\text{Phosphorus}} = 8.12 \times 10^{20} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^3}$$

ดังนั้นค่าของ

$$D = 2.59 \times 10^{-14} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$Q(t) = 2 \times 8.12 \times 10^{20} \sqrt{\frac{2.59 \times 10^{-14} \times 3600}{3.14}} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^2}$$

$$Q(t) = 8.83 \times 10^{15} \frac{\text{atom}}{\text{cm}^2}$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการของ Gaussian Distribution มาแก้สมการเพื่อค่า $x = x_j$ จะได้

จากสมการ

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)}$$

$$\ln[N(x, t)] = \ln \left[\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot e^{\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)} \right]$$

$$\ln[N(x, t)] = \ln \left[\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right] + \ln \left[e^{\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)} \right]$$

$$\ln[N(x, t)] = \ln \left[\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right] + \left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

$$x^2 = 4Dt \times \left[\ln \left[\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right] - \ln[N(x, t)] \right]$$

ดังนั้น

$$x_j = \sqrt{4Dt \times \left[\ln \left[\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right] - \ln[N(x, t)] \right]}$$

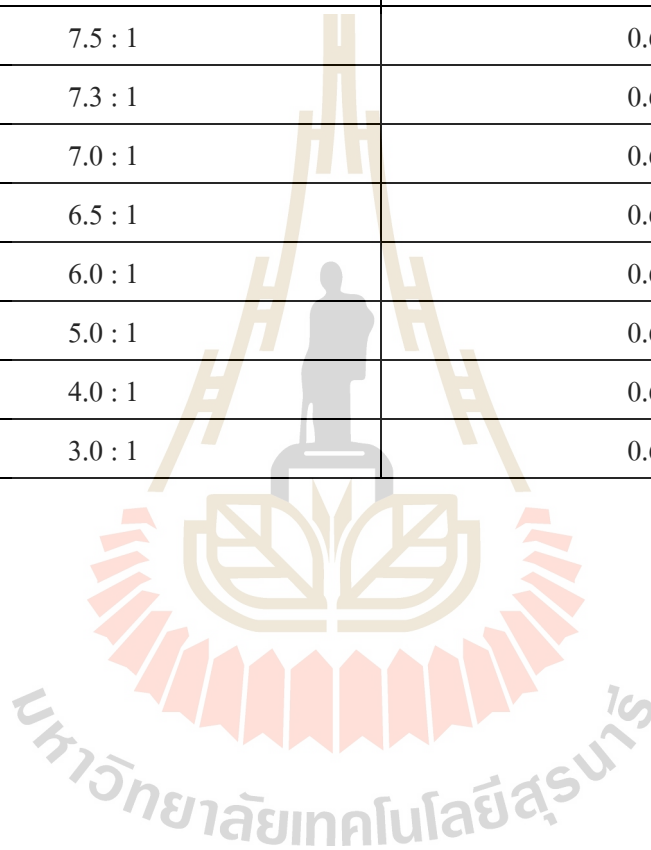
$$x_j = \sqrt{4 \times 2.59 \times 10^{-14} \times 3600 \times \left[\ln \left[\frac{8.83 \times 10^{15}}{\sqrt{3.14 \times 2.59 \times 10^{-14} \times 3600}} \right] - \ln[1.00 \times 10^{16}] \right]}$$

$$x_j = 0.64 \mu\text{m}$$

ดังนั้นการคำนวณด้วยวิธีของ Gaussian Distribution ค่าความลึกของชั้น n ที่ได้จากการแพร่สารเจือเนื้อไข 3:1 มีค่าเท่ากับ 0.64 ไมโครเมตร

ตารางภาคผนวก ค2 ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นด้วยวิธีของ Gaussian Distribution

Diffusion temperature = 1000 °C and Diffusion time = 60 min	
Condition TEOS : H ₃ PO ₄	Depth of n layer x _j (μm)
9.0 : 1	0.61
8.5 : 1	0.61
8.0 : 1	0.61
7.5 : 1	0.61
7.3 : 1	0.61
7.0 : 1	0.61
6.5 : 1	0.61
6.0 : 1	0.62
5.0 : 1	0.62
4.0 : 1	0.63
3.0 : 1	0.64



ภาคผนวก ง

ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซีดีคอนด้วยวิธี

Radio Corporation of America

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America

การทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี Radio Corporation of America (RCA1, RCA2) และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA1

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA1 เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ออกจากแผ่นซิลิคอน โดยสารละลายที่ใช้สำหรับล้างแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA1 ประกอบไปด้วย H_2O (DI water) H_2O_2 และ NH_4OH ด้วยอัตราส่วน $H_2O : H_2O_2 : NH_4OH$ เท่ากับ 5 : 1 : 1 หลังจากที่ได้สารละลาย RCA1 แล้วให้นำแผ่นซิลิคอนลงไปแช่ในสารละลายที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI

2. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA2

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA2 เป็นวิธีที่ใช้กำจัดอนุภาคของโลหะที่ผิวซิลิคอน โดยสารละลายที่ใช้ทำความสะอาดด้วยวิธี RCA2 ประกอบไปด้วย H_2O (DI water) H_2O_2 และ HCl ด้วยอัตราส่วนของ $H_2O : H_2O_2 : HCl$ เท่ากับ 5 : 1 : 1 หลังจากที่ได้สารละลาย RCA2 แล้วให้นำแผ่นซิลิคอนลงไปแช่ในสารละลายที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

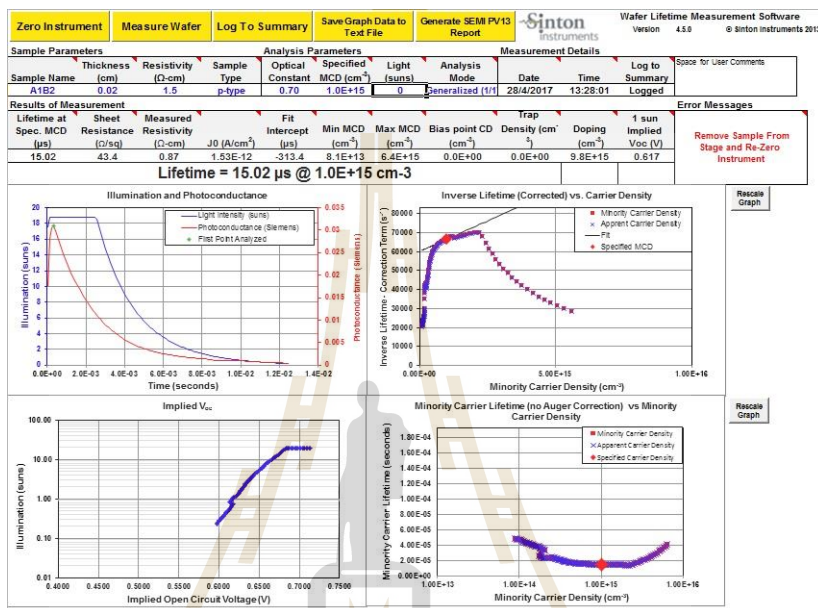


ภาคผนวก จ

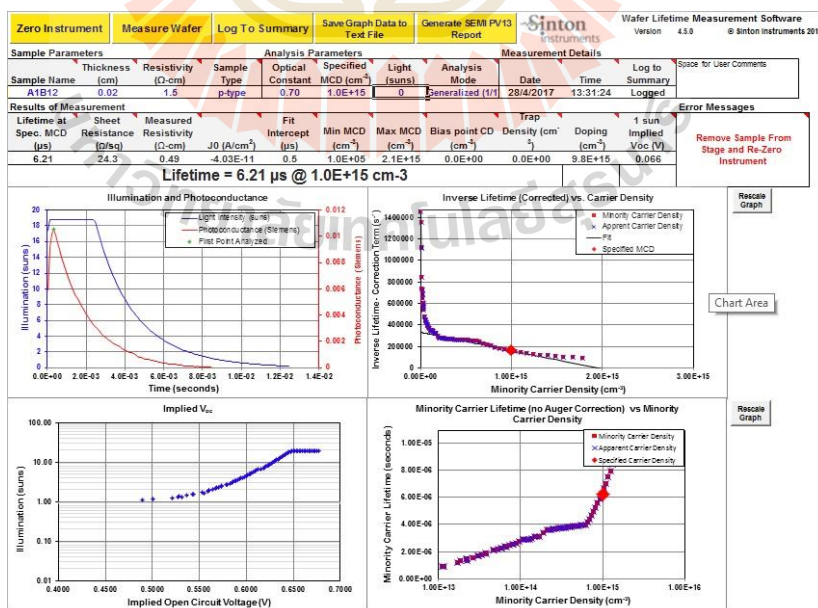
ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime) ด้วยเครื่อง WCT-120 Sinton

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

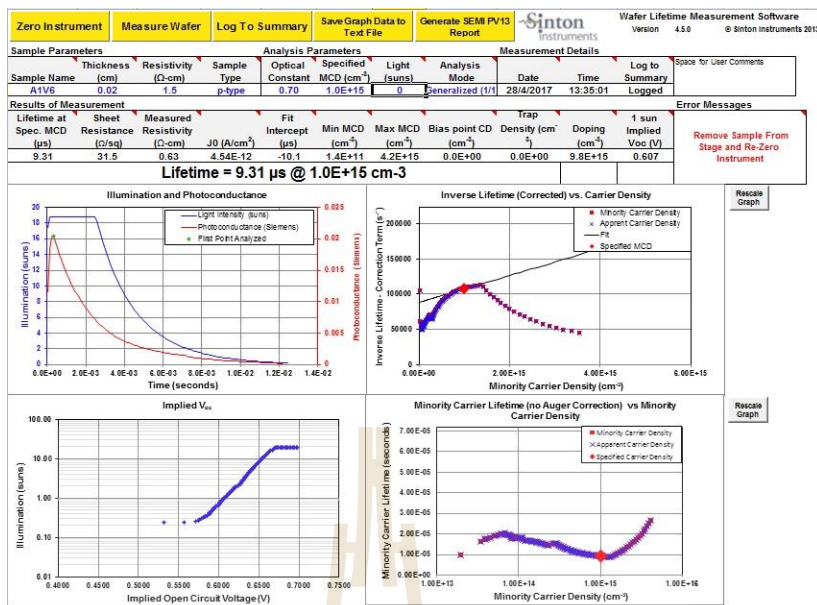
แสดงรายละเอียดผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง WCT-120 Sinton ที่แสดงในบทที่ 4 ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะของชั้น n-Si ที่ผ่านกระบวนการ Etch Back



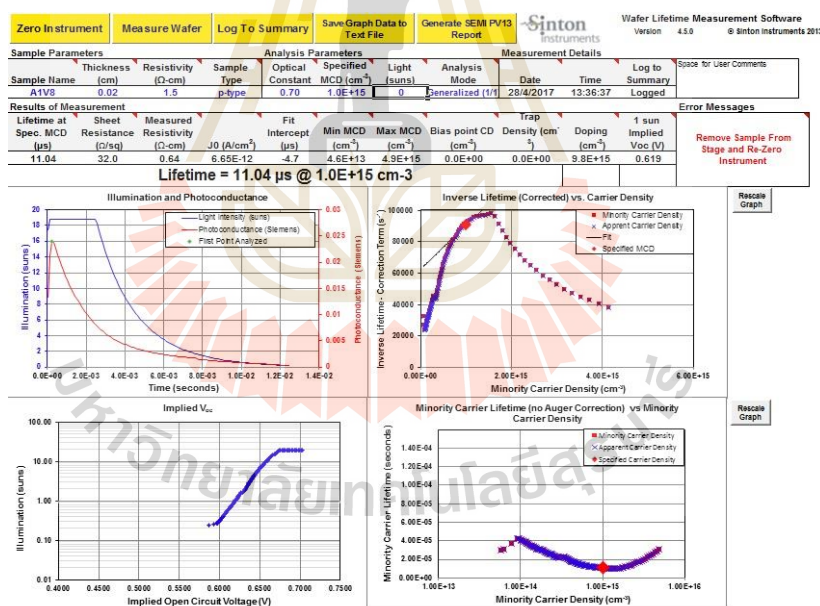
รูปที่ ๓1 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-Ref. จากเครื่อง WCT-120 Sinton



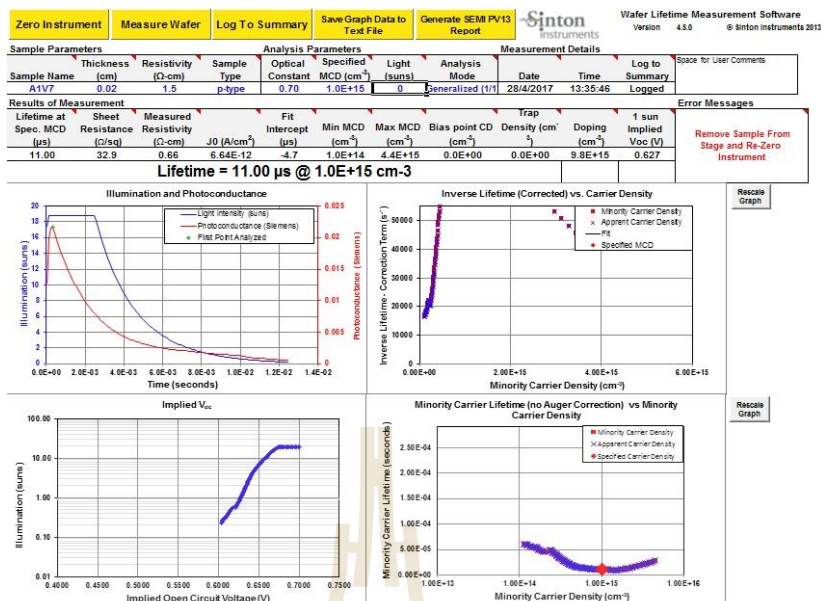
รูปที่ ๓2 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-SE1 จากเครื่อง WCT-120 Sinton



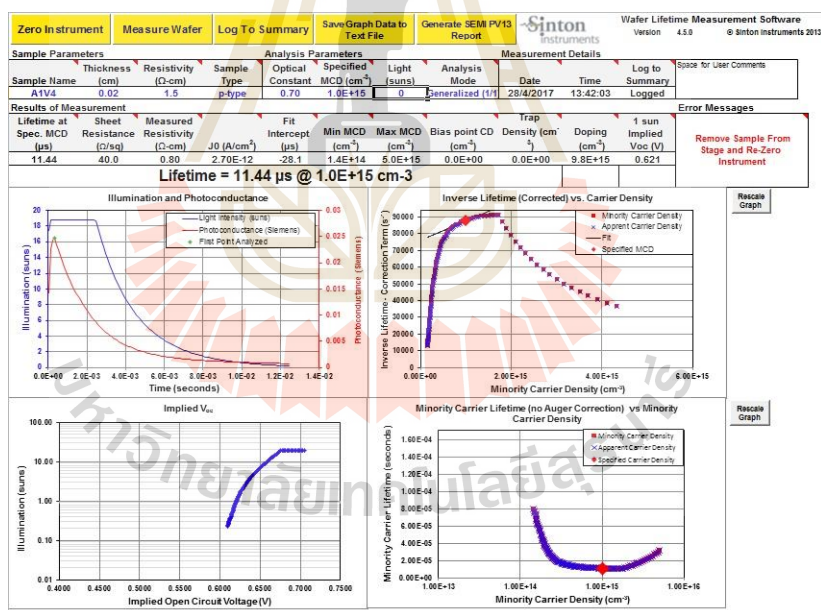
รูปที่ ๓3 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-SE2 จากเครื่อง WCT-120 Sinton



รูปที่ ๓4 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-SE3 จากเครื่อง WCT-120 Sinton



รูปที่ ๓ ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-SE4 จากเครื่อง WCT-120 Sinton



รูปที่ ๓๖ ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะเงื่อนไข PV-SE5 จากเครื่อง WCT-120 Sinton



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา

อภิรักษ์ มังกรแก้ว และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ (18-20 พฤศจิกายน 2558), “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38), vol.2, pp.707-710.

อภิรักษ์ มังกรแก้ว และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ (8-10 มิถุนายน 2559), “การสร้างอิมิตเตอร์และชั้นไดโอดอิเล็กทริกสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการพิมพ์ลาย”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 (ENETT12).

Fangsuwannarak, T., Phiwpha, N., Mangkornkaew, A., and Sopitpan, S.(2014). **Preparation of Different Phosphorus Concentration for N^+ Selective Emitter Solar Cell by Spin on Doping**. GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Proceedings.

Mangkornkaew, A., and Fangsuwannarak, T.(2017). **Characterization of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell**. 2017 5th Asia Conference on Mechanical and Mechanical and Materials Engineering (ACMME 2017).



Characterization of patterns of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure

A Mangkornkaew¹ and T Fangsuwannarak¹

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

E-mail: thipwan@g.sut.ac.th

Abstract. In the present, a novel cost effective process scheme for single step selective emitter diffusion was implemented. It is based on the fabrication of acid-resist pattern employing stamping technique with collaboration of a spin on dopant (SOD) and chemical etched-back emitter methods. The SOD diffusion process provided heavily doping n-emitter. Acid-resist pattern without exploitation of a complex method as a photolithography, was stamped as a metal contact pattern in order to protect localized heavy-dope region from etching back at the region. Phosphorus doping profiles were controlled effectively by etching back time to provide the formation of n-type selective emitter. Sheet resistivity of localized doping n-layer is tunable from 10 to 180 Ohm per square. After removal of the patterned acid-resist, the selective n-emitter solar cell structure was obtained under single step diffusion to response a better blue wavelength and low contact resistance.

1. Introduction

Today, photovoltaic (PV) technology is not only important to require renewable energy but also has more concern to clean environment and sustainable energy sources. One of the challenges for commercial PV cell manufacturers adapted is to further reduce the cost and to simultaneously improve the efficiency of PV cells.

One key limitation of present silicon industrial solar cells is the production based on homogeneous emitter region with a low sheet resistance of about 50-70 Ω/sq . Meanwhile, a junction depth of about 0.5-1 μm is required for a compromise between a sufficient contact quality of silver grid metallization and a low recombination rate at the front surface. It causes a problem of shorter life time of generated charge carriers because a low sheet resistance of homogeneous emitter from high dopant concentration provides high density of carrier recombination centres [1, 2]. Thus, conventional PV cell efficiency is usually below 17%.

The increase in sheet resistivity of n-emitter enables to reduce the Auger recombination, resulting in a better blue-light response and thus a higher I_{sc} . In addition, it is also able to provide a better front surface passivation, leading to a higher V_{oc} [3]. Nonetheless, another effect considered due to low dopant concentration is a severe contact quality between metal and silicon emitter, resulting in a lower fill factor and solar cell efficiency decreased [4].

In order to improve solar cells efficiencies, several optimization of emitter to require higher blue response and better contact quality has been investigated. One of the most potential method is selective emitters (SE) that feature a heavily-doped contact area underneath the metallized region and

a lightly-doped emitter area between front fingers. Crystal silicon SE solar cell is able to provide its efficiency improvement with a competitive production cost [5, 6].

Presently, commercially available researches involve dopant ink through an additional screen printing step and laser-based SE process, which are available for forming different regions including heavily-doped emitter region with about below $50 \Omega/\text{sq}$ and lightly-doped emitter region with about $90\text{--}110 \Omega/\text{sq}$. Si ink based SE technology has achieved an efficiencies of up to 19.2% on screen-printed c-Si solar cells [7,8]. However, both of the SE processes have relied on more masking steps, laser ablate openings and scribe grooves. These additional processes affect the rising cost, the complex laser processing, and the use of relatively expensive materials and equipment, which cause the main reasons for the industry's reluctance to adopt these technologies. Therefore, simple SE processing to replicate that based on low cost materials is required.

A stamp-patterning fabrication employing cheap flash foam is an alternative patterning technique to rapidly transfer acid-resist pattern in both micro-scale and nano-scale structures that is applicable to devices on planar, curved, flexible, or soft substrates, especially when low cost processing is required [8]. Although the stamping and etching steps are added in the process, the using repeat of inexpensive flash foam and etching solution is a highlight advantage. This approach is related to a pattern fabrication with stamping process to produce acid-resist area localized underneath the metallized region. A selective emitter structure with one diffusion step to form n-p shadow junction with highly doping concentration. This paper highlights the ability to achieve a wide range of dual doping concentrations using the flash form stamp and additional etch-back processing step. The study of variation in sheet resistivity via etched back processing times is demonstrated. The localized emitter feature which is patterned by using flash foam stamp, is characterized.

2. Experimental Details

Sol-gel consisting of heavily phosphorus concentration solution was prepared as SOD source. SOD solution was obtained to start from Tetraethylorthosilicate (TEOS, 98% Fluka), Ethanol absolute (EtOH, 99% BDH) and H₂O with a volume ratio of 5:10:1.5. Subsequently, the blend solution was stirred for 5 minutes at 70°C to ensure homogeneity. Phosphoric acid (H₃PO₄, 85% Ajax) was then added by a volume ratio of TEOS: H₃PO₄ at 3:1 and stirred for 40 minutes. The obtained mixture solution was cooled down to room temperature for 30 minutes.

P-type poly-crystalline silicon wafers ($\sim 1 \Omega\text{-cm}$) as substrates were textured by HF chemical etching and then were cleaned by standard Radio Corporation of America (RCA) method and subsequently were treated in dilute hydrofluoric acid (HF) solution for 1 minute. The mixture SOD solution was spun on the Si substrates at two speed steps at 1000 rpm/min for 10 seconds and 3000 rpm/min for 30 seconds. Subsequently, the wafers coated by SOD film were sintered at 1000°C for 60 minutes. The high heat-treatment acts as a thermal diffusion temperature to drive the phosphorus dopants into the silicon wafer in order to form the shallow n⁺⁺/p junction. The low sheet resistance of the n⁺⁺emitter layer was measured by a four-point probe technique.

Flash foam stamp (FFS) acts as photosensitive material, is a type of micro porous polymer. The FFS surface exposed by flash light will be burnt and sealed solution. A grid mask on top of the flash foam is exposed transferring the grid pattern to the FFS. The 2 regions of FFS surface morphologies consisting of liquid sealed part and unsealed part are created on a FFS. Acid resist solution was stored in the FFS and then stamped onto poly-Si substrate to flow through the unsealed pattern area. The acid resist features the grid metallization pattern stamped on n⁺⁺ emitter surface, thus the heavily doping area was kept fixed by the acid resist. After drying at 120°C for 30 minutes, to minimize the dopant concentration on the etching step as a etched-back emitter method was processed in HF:HNO₃ solution with the volume ratio of 200:1 in times variation. The influence of etching time on a decrease in sheet resistance of emitter layer was investigated.

3. Results and Discussions

FFS feature was changed when the FFS below the designed grid mask was exposed by light flashing. Fig.1 (a)-(b) shows FFS pattern composed of 2 different surface morphology areas: porous area

(unsealed area) and sealed solution area. As can be seen the scanning electron microscope (SEM) image in Fig.1(c), the locally unsealed region shown as porous openings has the size less than $20\text{ }\mu\text{m}$, which allows the solution flowing through. The size of FFS pattern obtained is consistent with the mask designed in a feature of PV grid contact pattern. Acid resist solution was stamped onto n^{++} Si surface by flowing through the patterned FFS.

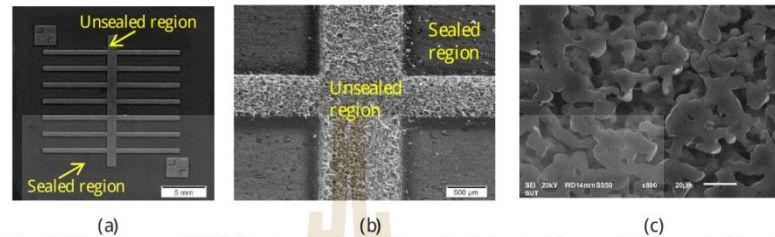


Fig. 1 Pattern images of FFS after transferring grid layout to feature in (a), magnified image in (b) and unsealed surface SEM image in (c).

After etching back n^{++} Si emitter, different values of emitter sheet resistance were obtained by varying the etching times as shown in Fig. 2. The sheet resistance of the processed emitters on poly-Si wafers was measured with a four-point probes technique. Each wafer was measured on five positions. Etching time extension from 0 - 45 second is able to provide the sharply change of emitter sheet resistance from $10\text{ }\Omega/\text{Sq}$ to $180\text{ }\Omega/\text{Sq}$ in average. It is found that sheet resistivity of n^{++} emitter is adjustable from varying etching times. The higher resistivity range is usually required between $90\text{--}110\text{ }\Omega/\text{Sq}$ that is form as a lightly doped emitter region for PV efficiency improvement.

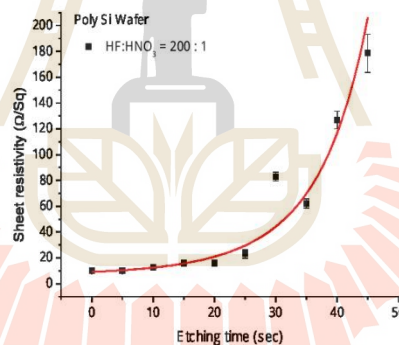


Fig. 2 Sheet resistance at different emitter etching times.

As shown in Fig. 3 the dark color pattern on poly-Si wafer showed the acid resist region which is able to prevent chemical etch in heavily doped area. When the n^{++} Si surface was patterned by FFS stamp to transfer acid resist as a grid pattern on the surface, the n^{++} emitter region was changed into lightly doped region during etched-back process. After removing acid-resist, the feature in dark color of localized n -Si emitter after etched-back process is shown in Fig.4 when we used the emitter etching time about 37 sec. Meanwhile, n^{++} Si region featured light color, thus selective emitter performing the

both of lightly doped region ($110 \Omega/\text{Sq}$) and heavily doped region ($< 20 \Omega/\text{Sq}$) are clarified as shown in light color pattern and dark color pattern, respectively. It is noted that different phosphorus concentration regions is fabricated by simple stamping technique without complex process as a photolithography.

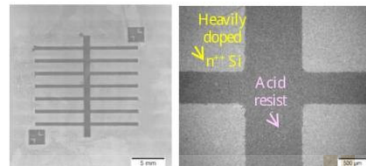


Fig. 3 Grid pattern images of acid resist pattern in dark color to be transferred from designed FFS.

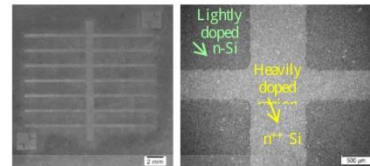


Fig. 4 Grid pattern feature of SE surface after etched-back process: lightly doped region with dark color and heavily doped region with light

4. Conclusion

The results of this study were revealed that the simple stamp coating is a potential method to produce a selective emitter in only one thermal diffusion step with one additional etching back step. By transferring grid pattern to $n^{++}\text{Si}$ emitter region, locally lightly dopant regions were performed at 37 sec for etching time without employing a complex procedure of photolithography. The $n^{++}\text{Si}$ region coverage with patterning acid resist was provided with less than $20 \Omega/\text{Sq}$ and there was $110\text{--}120 \Omega/\text{Sq}$ at lightly doped region.

The SE pattern was controlled by designing the feature of FFS. The proposed simple process employing stamping technique also shows clearly the potential to become more cost-effective than existing selective emitter processes relying on other additional complex procedure and expensive tools such as laser doping and photolithography steps.

5. References

- [1] Ulrich, Mahir O, et al, Selective emitter by laser doping from phosphosilicate glass 2009 24th European PV Solar Energy Conf. and Exhibition 21–25.
- [2] Ruby D S, Albuquerque N M, et al, Recent progress on the self-aligned selective-emitter silicon solar cell, 1997 26th IEEE PVSC 39–42.
- [3] Bentzen A, Holt A, et al, Stokkan Gettering of transition metal impurities during phosphorus emitter diffusion in multicrystalline silicon solar cell processing 2006 J. Appl. Phys. 99 093509.
- [4] Wagner H, Shirazi A D, et al, Optimizing phosphorus diffusion for photovoltaic 2016 J. Appl. Phys., 119 185704.
- [5] Kim M, Kim D, et al, Laser etch back process to fabricate highly efficient selective emitter 2014 Solar Energy 109 105–110.
- [6] Horzel J, Szlufcik J, et al, A simple processing sequence for selective emitters 1997 26th PVSC 139–140.
- [7] Scardera G, Meisel A, et al, High efficiency phosphorus emitters for industrial solar cells: comparing advanced homogeneous emitter cells and selective emitters using silicon ink technology 2012 27th EU PVSEC 923–5.
- [8] Sastrawan R, Aigner F, et al, Combining Laser Doping and Wet Chemical Etch Back for Industrial Selective Emitter Solar Cells 2012 27th EU PVSEC 1563 – 15659 [9] Qin D, Xia Y, et al, Soft lithography for micro-and nanoscale patterning 2010 Nat. Protoc. 5 491–502.

Acknowledgments

This study was supported by Suranaree University of Technology. The author would like to gratitude to Solartron Public Company Limited Thailand and Synchrotron Light Research Institute, Thailand for equipment support.

ประวัติผู้เขียน

นายอภิรักษ์ มังกรแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศรีเทพประชานุสรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552 ขณะกำลังศึกษาได้ทำโครงการงานเรื่องการศึกษาและพัฒนารถจักรยานสามล้อไฮบริดจ์ เพื่อนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2556 ขณะศึกษาทำโครงการงานเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

ในปี พ.ศ. 2556 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนในห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้รับรางวัลการประกวดสิ่งประดิษฐ์ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2559 ชื่อผลงาน เครื่องพิมพ์แบบ Piezoelectric สำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับเชิงพาณิชย์และสังเคราะห์หมึกพิมพ์ ได้เข้าร่วมเสวนาทางวิชาการในงาน พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน และทำการวิจัยในหัวข้อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปี 2558 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ผลงานวิจัย : มีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่จำนวน 3 บทความ ได้แก่ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 ปีพ.ศ. 2558 เรื่องการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 12 ปีพ.ศ. 2559 เรื่องการสร้างชั้นอิมิตเตอร์และชั้นไดอิเล็กตริกสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการพิมพ์ลาย และการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติชื่องาน 2017 5th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering จัดโดยมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น เรื่อง Characterization of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure